



**Frederico Pires Valadas Velez Telha**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Análise da influência da alteração do  
ângulo de contacto na injectabilidade de  
*grouts***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,  
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Pinho Ramos  
Arguente: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar  
Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho de 2015**



‘Copyright’ Frederico Pires Valadas Velez Telha, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques pela oportunidade concedida para a realização da presente dissertação, pelos ensinamentos transmitidos no âmbito deste trabalho e pela referência de conhecimento e competência que constituiu durante todo o percurso académico.

Em segundo lugar, gostaria igualmente de agradecer ao Mestre Fernando Jorne por todo o apoio, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade para esclarecimento de algumas questões fundamentais que foram surgindo no decorrer deste estudo.

Gostaria igualmente de agradecer ao Professor João Sotomayor por ter permitido o uso do goniómetro, que sem o qual não seria possível uma análise dos resultados experimentais com a mesma eficácia.

Quero também agradecer ao Engenheiro Vítor Silva todo o apoio no laboratório, e ao meu colega António Frade na ajuda para a realização dos ensaios experimentais.

Gostaria igualmente de agradecer aos meus amigos e colegas de mestrado com os quais passei bons momentos, que irei recordar com muita saudade. Em particular, quero agradecer ao Telmo Silva, ao Eduardo Neno e ao Bernardo Romão pela amizade de tantos anos e com quem sempre pude contar.

Não quero também deixar de realçar a experiência profissional que me foi proporcionada pela Administração do Porto de Lisboa num período de estágio coincidente com o desenvolvimento desta dissertação, e que serviu de complemento prático inicial da minha formação académica.

Por último, agradeço especialmente à minha família pelo apoio incondicional prestado e sacrifícios que fizeram por mim ao longo de todos estes anos, e por terem acreditado nas minhas capacidades e proporcionado tudo o que ambicionei.



## **Preâmbulo**

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação Optimização de caldas para consolidação de alvenarias (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que a esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.





## Resumo

Actualmente, a grande maioria dos monumentos e edifícios antigos que constituem os centros históricos e urbanos necessitam de profundas intervenções de reabilitação. Um dos seus principais problemas incide sobre as alvenarias de pedra que, devido à sua heterogeneidade, apresentam limitações a nível estrutural. Neste contexto, e também para correcção de outras anomalias existentes, são realizadas intervenções de consolidação de modo a torná-las funcionais e seguras face às exigências actuais. Uma das técnicas mais utilizadas de consolidação dessas alvenarias é a injeção de *grouts*, que tem sido considerada adequada no restabelecimento da compacidade, uniformidade de tensões e continuidade entre diferentes panos de alvenaria antiga. A utilização desta técnica de consolidação tem como objectivo não só aumentar a compacidade da parede de alvenaria através do preenchimento dos vazios existentes e, consequentemente, a resistência mecânica do meio injectado, mas também criar uma ligação entre os diferentes panos, incrementando o comportamento monolítico da alvenaria.

Outro aspecto não menos importante a ter em conta numa injeção de *grout* reside na compatibilidade com os materiais existentes. Neste estudo, optou-se pela utilização de um *grout* a base de cal hidráulica tendo em conta as suas características química, física e mecânica com os materiais de alvenarias antigas. O *grout* deve ser concebido de forma a obter o melhor desempenho, quer a nível de injectabilidade, quer de durabilidade. Assim, optou-se por fazer um estudo prévio da composição do *grout* considerando-se a presença de diferentes quantidades de superplastificante. Aliás, o estudo das características do meio poroso considera-se tão relevante como o estudo das características do *grout*. Após inserido no meio poroso, devido às características de absorção das partículas constituintes do meio, o *grout* vai perdendo as suas propriedades (perda de água da sua composição), surgindo consequentemente problemas de penetração do *grout*. Neste sentido, no presente trabalho é abordado um novo factor no processo de injeção que tem como objectivo diminuir esse efeito de sucção da água constituinte do *grout* por parte do meio poroso, através da alteração do ângulo de contacto entre o *grout* e o meio poroso.

Com o intuito de estudar o factor diferenciador da injeção referido e de avaliar a eficiência da injeção de *grouts* nesses meios porosos, procedeu-se à criação de modelos que simulassem, com a maior fiabilidade possível, diferentes permeabilidades passíveis de caracterizar o núcleo interior de alvenarias antigas. De modo a avaliar a qualidade destas injeções de *grout* recorreu-se a ensaios de ultra-sons e à técnica de tomografia ultra-sónica. A combinação destas técnicas de análise não-destrutivas revelou-se de grande utilidade na aferição da morfologia interna dos modelos criados, permitindo a obtenção de informações qualitativas e quantitativas sobre os meios porosos em estudo. Foram também realizados ensaios de resistência à tracção por compressão diametral de forma a conhecer as resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeção dos meios

porosos.

**Termos-chave:** *grout* de cal hidráulica, superplastificante, meio poroso, ângulo de contacto, ultrasons, tomografia ultra-sónica, ensaios mecânicos

## Abstract

Currently, the vast majority of ancient monuments and buildings which form the historical and urban centers require deep rehabilitation interventions. One of its main problems concerns the old masonries that, due to their heterogeneity, have limitations in terms of structural behavior. In this context, and also to correct other anomalies, consolidation interventions are performed in order to make them functional and safe given the current requirements. One of the most widely used consolidation techniques is the injection of grouts in masonry, which has been considered adequate in restoring compactness, uniformity of tension and continuity between different leaves of old masonry. The use of this consolidation technique aims not only to increase the compactness of the masonry wall by filling the existing voids and hence, the mechanical strength of the injected medium, but also create a link between different leaves by increasing the monolithic behavior of masonry.

Another aspect not least to consider in a grout injection resides in compatibility among existing materials. In this study it was decided to use a hydraulic lime based grout with regard to its chemical, physical and mechanical characteristics with the old masonry materials. The grout should be designed in order to get the best performance in terms of injectability and durability. Thus, it was decided to do a preliminary study of the grout composition considering the presence of different amounts of superplasticizer. Moreover, the study of the characteristics of the porous medium is considered as relevant as the study of the characteristics of grout. Once injected into porous medium, the grout, due to the porous medium characteristics, loses its properties and consequently arise grout penetration problems. Thereby, in this work it is discussed a new factor in the injection process that aims to reduce this suction effect of grout particles from the porous medium by changing the contact angle between the grout and the porous medium.

In order to study the described differentiator factor and evaluate the grouts injection efficiency in these porous mediums, the creation of models that simulate, with the highest possible reliability, different permeabilities capable of characterizing the interior leaf of ancient multi-leaves masonries was carried out. In order to assess the quality of these grout injections, there were used ultrasonic tests and ultrasonic tomography. The combination of these non-destructive analysis techniques proves to be very useful in assessing internal morphology of the models, providing qualitative and quantitative information about the porous medium studied. Posteriorly, there were also performed Splitting Strength Tests in order to determine the mechanical strength and its relationship with the quality injection of porous mediums.

**Keywords:** hydraulic lime grout, superplasticizer, porous medium, contact angle, ultrasonic-test, ultrasonic tomography, mechanical tests



# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objectivos.....	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação.....	3
<b>2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Técnica de injeção de <i>grout</i> .....	5
2.1.1. Noção de <i>grout</i> .....	7
2.2. Estudo do <i>grout</i> .....	9
2.2.1. Propriedades do <i>grout</i> no estado fresco.....	9
2.2.2. Superplastificantes.....	13
2.2.3. Propriedades do <i>grout</i> no estado endurecido.....	15
2.3. Influência do meio poroso na injectabilidade do <i>grout</i> .....	15
2.3.1. Tensão superficial.....	17
2.3.2. Ângulo de contacto.....	18
2.3.3. Fenómeno da molhabilidade.....	19
2.3.4. Efeito de sucção capilar.....	21
2.3.5. Ligação mecânica do conjunto <i>grout</i> /meio poroso.....	23
<b>3. CAMPANHA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>25</b>
3.1. Estudo do <i>grout</i> .....	25
3.1.1. Materiais utilizados na composição do <i>grout</i> .....	25
3.1.2. Procedimento de mistura .....	27
3.1.3. Ensaio realizados no estado fresco .....	28
3.1.3.1. Ensaio do cone de Marsh .....	28
3.1.3.2. Ensaio de espalhamento .....	30
3.1.3.3. Ensaio de estabilidade .....	31
3.1.3.4. Ensaio de retenção de água .....	32
3.1.4. Ensaio realizados no estado endurecido .....	33
3.1.4.1. Ensaio de determinação das resistências à flexão e à compressão.....	33
3.2. Estudo do meio poroso .....	36
3.2.1. Materiais estudados .....	36
3.2.1.1. Material arenoso.....	36
3.2.1.2. Material calcário .....	37
3.2.1.3. Material cerâmico .....	38
3.2.2. Ensaio realizados no estado fresco .....	43
3.2.2.1. Ensaio de injeção.....	43
3.2.3. Ensaio realizados no estado endurecido .....	45
3.2.3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons .....	45

3.2.3.2.	Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	48
3.2.3.3.	Tomografia ultra-sónica.....	50
<b>4.</b>	<b>VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO <i>GROUT</i> .....</b>	<b>53</b>
4.1.	Introdução.....	53
4.2.	Avaliação das propriedades do <i>grout</i> .....	54
4.2.1.	Ensaio do cone de Marsh.....	54
4.2.2.	Ensaio de espalhamento .....	55
4.2.3.	Ensaio de estabilidade .....	57
4.2.4.	Ensaio de retenção de água.....	57
4.2.5.	Ensaio de determinação das resistências à flexão e à compressão .....	58
4.3.	Avaliação da consolidação do <i>grout</i> para as diferentes composições .....	59
4.3.1.	Ensaio de injeção .....	59
4.3.2.	Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral ....	60
4.3.3.	Tomogramas ultra-sónicos .....	63
4.4.	Considerações finais acerca dos ensaios realizados .....	70
<b>5.</b>	<b>REDUÇÃO DA SUCCÃO DO MEIO POROSO .....</b>	<b>73</b>
5.1.	Introdução.....	73
5.2.	Aplicação de tratamento de superfície no meio poroso.....	74
5.3.	Caracterização do meio poroso .....	76
5.3.1.	Medição do ângulo de contacto.....	76
5.3.2.	Ensaio de absorção de água.....	78
5.4.	Avaliação da consolidação do <i>grout</i> em diferentes meios porosos .....	80
5.4.1.	Ensaio de injeção .....	80
5.4.2.	Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral ....	84
5.4.2.1.	Amostras cerâmicas .....	84
5.4.2.2.	Amostras de calcário.....	87
5.4.2.3.	Comparação entre as amostras cerâmicas e as amostras de calcário .....	89
5.4.3.	Tomogramas ultra-sónicos .....	91
5.4.3.1.	Amostras cerâmicas .....	91
5.4.3.2.	Amostras de calcário.....	98
5.4.3.3.	Comparação entre as amostras cerâmicas e as amostras de calcário .....	101
5.4.4.	Pré-molhagem do meio poroso Vs. Tratamento de superfície .....	108
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>111</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>115</b>

## Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção .....	8
Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica .....	26
Quadro 3.2 – Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine .....	26
Quadro 3.3 – Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF.....	27
Quadro 3.4 – Características do superplastificante .....	27
Quadro 3.5 – Composição dos diferentes <i>grouts</i> em estudo .....	26
Quadro 3.6 – Composição do meio poroso constituído por areia .....	37
Quadro 3.7 – Características do meio poroso de areia .....	37
Quadro 3.8 – Meios porosos injectados (material calcário e cerâmico).....	39
Quadro 3.9 – Características dos meios porosos (material calcário e cerâmico) .....	41
Quadro 4.1 – Tensão de resistência à flexão e à compressão dos <i>grouts</i> em estudo.....	58
Quadro 4.2 – Amostras de areia; 0 min: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral .....	61
Quadro 4.3 – Amostras de areia; 60 min: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral .....	62
Quadro 5.1 – Medições do ângulo de contacto com recurso ao goniómetro.....	77
Quadro 5.2 – Capacidade de absorção de água das amostras com o tratamento de superfície aplicado .....	79
Quadro 5.3 – Amostras cerâmicas: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral.....	84
Quadro 5.4 – Amostras de calcário: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral.....	87





## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Injeção de <i>grout</i> em alvenaria .....	5
Figura 2.2 – Procedimento esquemático para aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria .....	6
Figura 2.3 – Representação do efeito da injeção de <i>grouts</i> com maior e menor tensão de cedência ..	10
Figura 2.4 – Representação esquemática dos fenômenos de exsudação e segregação.....	12
Figura 2.5 – Esquema representativo do efeito do superplastificante sobre as partículas de <i>grout</i> .....	14
Figura 2.6 – Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano ( <i>grout</i> ) .....	16
Figura 2.7 – Mecanismo da formação da tensão superficial em moléculas de água .....	18
Figura 2.8 – Representação dos diferentes ângulos de contacto .....	19
Figura 2.9 – Equilíbrio na linha de fronteira entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido....	20
Figura 2.10 – Esquema do processo de molhagem de um sólido por um líquido .....	20
Figura 2.11 – Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do <i>grout</i> .....	22
Figura 3.1 – Distribuição da granulometria da cal HL5 .....	26
Figura 3.2 – Ensaio do cone de Marsh. Esq.: Modelo real adotado; Dir.: Medidas do cone de Marsh .....	29
Figura 3.3 – Esquema representativo do ensaio de espalhamento .....	30
Figura 3.4 – Procedimento do ensaio de espalhamento. Esq.: Colocação do molde cilíndrico; Dir.: Espalhamento do <i>grout</i> após levantamento do molde cilíndrico.....	31
Figura 3.5 – Esquema representativo do ensaio de estabilidade .....	32
Figura 3.6 – Ensaio de estabilidade. Esq.: Equipamento utilizado no ensaio de estabilidade; Dir.: Esfera imersa na amostra de <i>grout</i> .....	32
Figura 3.7 – Ensaio de retenção de água. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adotado para medição da retenção de água.....	33
Figura 3.8 – Provetes prismáticos (esq.) e moldes metálicos utilizados (dir.) .....	34
Figura 3.9 – Sistema de ensaio de resistência à flexão.....	34
Figura 3.10 – Sistema de ensaio de resistência à compressão.....	35
Figura 3.11 – Areia: Quatro dimensões diferentes (grosso, médio, fino e mais fino).....	36
Figura 3.12 – Areia: Curva granulométrica do meio poroso.....	37
Figura 3.13 – Material calcário: Três dimensões diferentes (grossa, média, fina).....	38
Figura 3.14 – Material cerâmico: Três dimensões diferentes (grossa, média, fina).....	38
Figura 3.15 – Procedimento realizado para obtenção dos diferentes tipos de meios porosos.....	39
Figura 3.16 – Material calcário: Curvas granulométricas dos diferentes tipos de meio poroso.....	39
Figura 3.17 – Material cerâmico: Curvas granulométricas dos diferentes tipos de meio poroso.....	40

Figura 3.18 – Ensaio de permeabilidade. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adoptado para medição da permeabilidade do meio poroso .....	41
Figura 3.19 – Material cerâmico: Fluxo de água [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] vs Pressão [Bar] .....	42
Figura 3.20 – Material calcário: Fluxo de água [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] vs Pressão [Bar] .....	42
Figura 3.21 – Esquema representativo do método de injeção .....	44
Figura 3.22 – Modelo real do método de injeção .....	44
Figura 3.23 – Medição efectuada num provete inteiro (esq.) e numa fatia (dir.) através do método por transmissão directa .....	46
Figura 3.24 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1' (dir.) .....	46
Figura 3.25 – Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes .....	47
Figura 3.26 – Corte do provete.....	47
Figura 3.27 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de em cada fatia inteiro: vista de topo (esq.) e vista lateral (dir.) .....	48
Figura 3.28 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral .....	48
Figura 3.29 – Medição das dimensões da fatia: diâmetro (esq.) e espessura (dir.) .....	49
Figura 3.30 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral .....	49
Figura 3.31 – Aspecto de uma fatia de uma amostra de calcário após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	50
Figura 3.32 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOM (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.) .....	51
Figura 4.1 – Esquema representativo do processo de selecção do tipo de <i>grout</i> a ser utilizado na 2ª fase da campanha experimental .....	54
Figura 4.2 – Influência da dosagem de superplastificante sobre o factor de fluidez para 0, 30 e 60 minutos de tempo de repouso após preparação do <i>grout</i> .....	55
Figura 4.3 – Influência da dosagem de superplastificante no diâmetro de espalhamento para 0, 30 e 60 minutos de tempo de repouso após a preparação do <i>grout</i> .....	56
Figura 4.4 – Diâmetro de espalhamento de <i>grout</i> com 0,4 % (esq.) e 1,2 % (dir.) de superplastificante .....	56
Figura 4.5 – Percentagem de massa volúmica inicial em função do tempo para diferentes dosagens superplastificante, de acordo com o ensaio de estabilidade proposto .....	57
Figura 4.6 – Influência da dosagem de superplastificante no tempo de retenção de água .....	58
Figura 4.7 – Influência da dosagem de superplastificante na injectabilidade do <i>grout</i> para diferentes tempos de repouso (0min e 60 min, respectivamente) .....	59
Figura 4.8 – Exemplo da amostra de areia injectada com <i>grout</i> com 0,4% de superplastificante para um tempo de repouso de 60 min (face superior da fatia da base) .....	60

Figura 4.9 – Amostras de areia; 0 min: Tomogramas ultra-sônicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante .....	63
Figura 4.10 – Amostras de areia; 60 min: Tomogramas ultra-sônicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante .....	64
Figura 4.11 – Amostras de areia; 0,4%SP: Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras com os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min, respectivamente).....	65
Figura 4.12 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2).....	66
Figura 4.13 – Amostra de areia; 0,4%SP, 60min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base .....	67
Figura 4.14 – Amostra de areia; 0,4%SP, 0min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base .....	67
Figura 4.15 – Amostras de areia; 1,2%SP: Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras com os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min, respectivamente).....	68
Figura 4.16 – Amostra de areia; 1,2%SP, 0min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	69
Figura 4.17 – Amostra de areia; 1,2%SP, 0 min: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) do cilindro	69
Figura 4.18 – Amostra de areia; 1,2%SP, 60min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	70
Figura 4.19 – Amostra de areia; 1,2%SP, 60 min: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) do cilindro .....	70
Figura 5.1 – Esquema representativo dos ensaios realizados na 2ª fase da campanha experimental ....	74
Figura 5.2 – Actuação de um silicone sobre uma superfície polar .....	75
Figura 5.3 – Medição do ângulo de contacto através do goniómetro .....	76
Figura 5.4 – Diferentes amostras com o tratamento de superfície aplicado .....	77
Figura 5.5 – Exemplo de ângulo de contacto entre a gota de água e a superfície do material sujeita a tratamento hidrófobo .....	78
Figura 5.6 – Amostras cerâmicas: Resultados dos ensaios de injectabilidade .....	81
Figura 5.7 – Alturas atingidas pelo <i>grout</i> no momento da injeção no meio poroso A composto por material cerâmico e consoante a proporção da dissolução de silicone: a) 1:6, b) 1:4 e c) 1:2 .....	82
Figura 5.8 – Amostras de calcário: Resultados dos ensaios de injectabilidade.....	83
Figura 5.9 – Amostras cerâmicas; Tipo A: Tomogramas ultra-sônicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone ...	92
Figura 5.10 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base .....	93

Figura 5.11 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	93
Figura 5.12 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	94
Figura 5.13 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	94
Figura 5.14 – Amostras cerâmicas; Tipo A: Fotografia (esq.) e tomogramas 3D (dir.) das amostras consoante a proporção da dissolução de silicone .....	95
Figura 5.15 – Amostras cerâmicas; Tipo B: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone ...	96
Figura 5.16 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	97
Figura 5.17 – Amostras de calcário; Tipo A: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone .....	98
Figura 5.18 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	99
Figura 5.19 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	99
Figura 5.20 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio .....	99
Figura 5.21 – Amostras de calcário; Tipo B: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone .....	100
Figura 5.22 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:6: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas das amostras .....	101
Figura 5.23 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	103
Figura 5.24 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	103
Figura 5.25 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	103
Figura 5.26 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:4: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas das amostras .....	104
Figura 5.27 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	105

Figura 5.28 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	105
Figura 5.29 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	105
Figura 5.30 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	106
Figura 5.31 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:2: Tomogramas ultra-sônicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas das amostras .....	106
Figura 5.32 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	107
Figura 5.33 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	107
Figura 5.34 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	108
Figura 5.35 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo .....	108
Figura 5.36 – Pré-molhagem Vs. Aplicação de tratamento de superfície: Resultados de injectabilidade e de resistência à tracção por compressão diametral das amostras cerâmicas.....	109
Figura 5.37 – Pré-molhagem Vs. Aplicação de tratamento de superfície: Resultados de injectabilidade e de resistência à tracção por compressão diametral das amostras de calcário .....	109

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do tema

Um largo número do património edificado representa o tipo de construção em alvenaria nos mais variados centros históricos e urbanos em toda a Europa e no mundo. Devido não apenas ao valor patrimonial, mas também ao cultural e arquitectónico desses edifícios antigos surge a preocupação em manter a utilização dos mesmos, garantindo melhores condições de habitabilidade, segurança e conforto. Parcela significativa destas edificações construídas em alvenaria encontra-se frequentemente em mau estado de conservação, pelo que requerem técnicas de reparação diferentes daquelas utilizadas em outras situações de edifícios modernos.

Em geral, dadas as suas características, as paredes de alvenaria de pedra são mais carecedoras de acções de consolidação. Esta tipologia de alvenaria pode apresentar na sua constituição um único pano ou múltiplos panos. No caso de uma alvenaria de múltiplos panos, a secção é constituída por dois panos exteriores resistentes de textura irregular e um núcleo interior preenchido por pequenas pedras, areia, argamassa ou qualquer outro tipo de material não coeso (Vintzileou, 2011). A ausência de coesão entre os elementos de alvenaria, a existência de vazios e fendas, assim como a deficiente ligação entre panos, leva a um comportamento não-monolítico das paredes de alvenaria. Isto significa que a parede apresenta vulnerabilidades específicas, tanto sob a acção de cargas verticais como horizontais [(Collepari, 1990), (Valluzzi, 2005)]. Assim, para estabilizar essas paredes e prevenir o colapso frágil da estrutura, a injeção de *grout* apresenta-se como uma técnica de consolidação amplamente recomendada desde a década de 80 [(Kalagri et al., 2010), (Miltiadou-Fezans, 1990), (Vintzileou, 2011)]. O principal objectivo desta técnica de consolidação consiste não apenas em aumentar a compacidade da alvenaria, que por sua vez melhora a sua resistência à compressão, como criar adesão entre os elementos no interior da parede, e ao mesmo tempo restabelecer ligações entre os panos exteriores e interiores da alvenaria. Este objectivo é alcançado através do preenchimento não só dos vazios ou fendas presentes na parede de alvenaria, mas criando simultaneamente uma ligação entre os panos referidos. Desta forma, é melhorado o comportamento monolítico e a resistência às cargas permanentes sem alterar a morfologia e o sistema de suporte de carga da parede de alvenaria [(Binda et al., 1997), (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013)].

Ainda assim, antes de qualquer intervenção de reabilitação deve ser tida em consideração a compatibilidade entre os materiais originais e os materiais que irão ser aplicados. Segundo Callebaut et al. (Callebaut et al., 2001), a utilização do ligante cimento na conservação de edifícios históricos pode causar graves anomalias devido às suas diferentes características comparativamente aos materiais já existentes, tais como a elevada resistência mecânica, elevado módulo de elasticidade e reduzida permeabilidade. Assim, torna-se necessário analisar previamente a composição do *grout* tendo em

conta os seus materiais constituintes. A real influência das propriedades do *grout* fresco no desempenho da injeção deve ser considerada de forma a assegurar a eficiência desta técnica de consolidação de paredes de alvenaria. Deste modo, neste estudo optou-se pela utilização da cal hidráulica, pois trata-se de um ligante com propriedades mecânicas, físicas e químicas que mais se assemelham aos materiais originais em alvenarias antigas (Binda et al., 1997). Optou-se ainda pela introdução de um adjuvante na composição do *grout*, nomeadamente um superplastificante, com o objectivo de melhorar o desempenho da injeção.

No entanto, há ainda que ter em conta outro aspecto muito importante na injeção de *grouts*. O poder de penetração do *grout* depende de diferentes factores, não apenas de carácter intrínseco (como a granulometria da componente sólida da mistura, por exemplo) mas também de carácter extrínseco como a morfologia do suporte (fenómenos de absorção/adsorção) e materiais constituintes (granulometria e superfície específica). Sendo assim, considerou-se igualmente pertinente estudar a influência do meio poroso no momento da injeção do *grout* que, consequentemente, também contribui para uma melhor ou pior injectabilidade do *grout*. Por outras palavras, pretende-se avaliar a capacidade de penetração do *grout* tendo em conta o efeito de sucção causado pela rápida absorção de água da composição do *grout* por parte do meio poroso. O presente estudo dá continuidade a outros trabalhos já realizados [(Coelho, 2013), (Jorne et al., 2015b)] onde se verificaram injeções não tão bem sucedidas em certos meios porosos.

Com vista a avaliar a penetrabilidade do *grout* no interior do meio poroso, à semelhança de anteriores investigações de outros autores [(Brás & Henriques, 2012), (Kalagri et al., 2010), (Jorne et al., 2012a), (Jorne et al., 2014), (Jorne et al., 2015b), (Van Rickstal et al., 2003)], foram realizados ensaios de injectabilidade com o objectivo de avaliar a qualidade de injeção de *grout* no núcleo interno de alvenarias antigas. Para tal, foram criados modelos que simulam com a maior fiabilidade possível diferentes meios porosos com granulometrias e natureza distintas, que possam existir na constituição do núcleo interno das alvenarias antigas. Posteriormente, procedeu-se à realização dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons, bem como à técnica de tomografia ultra-sónica, ambos métodos de análise não-destrutivos, que permitem aferir a qualidade das injeções do ponto de vista da injectabilidade do *grout*, ou seja, permitem identificar zonas de injeção onde o *grout* tem maior dificuldade de penetração. Adicionalmente, com o intuito de conhecer as resistências mecânicas das amostras e as respectivas comparações com os resultados obtidos dos ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica, procedeu-se à realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*).

De referir que a campanha experimental efectuada na presente dissertação foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, e surge na sequência de outras injeções de *grout* realizadas em diferentes meios porosos no contexto desse estudo. É importante salientar que a utilização combinada destas técnicas acima mencionadas pode ser aplicada de uma forma bastante útil na detecção da morfologia interna dos modelos criados, permitindo a obtenção de

informações qualitativas e quantitativas sobre os meios porosos estudados.

## **1.2. Objectivos**

A presente dissertação tem como objectivo principal a análise da influência da alteração do ângulo de contacto dos diferentes meios porosos (material calcário e material cerâmico) na injectabilidade dos *grouts*. Por outras palavras, pretende-se reduzir a capacidade de absorção de água desses meios porosos referidos de modo a melhorar a penetração do *grout* e a sua difusão de forma homogénea no interior do meio poroso. Para tal, de maneira a avaliar a eficiência de injeção de *grouts* nos diferentes meios porosos recorre-se a ensaios não-destrutivos, nomeadamente através do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e tomografia ultra-sónica.

Para estudar a adequabilidade do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons comparam-se os resultados obtidos recorrendo a esta técnica com os resultados provenientes dos ensaios mecânicos, nomeadamente através da determinação da resistência à tracção por compressão diametral.

Por fim, pretende-se avaliar a fiabilidade da utilização de tomografia ultra-sónica na avaliação da eficiência da técnica de injeção em diferentes casos, com recurso a imagens em 2D e 3D.

Esta pesquisa é parte de um estudo mais amplo [(Baltazar et al., 2012a), (Baltazar et al., 2013a), (Baltazar et al., 2014), (Baltazar & Henriques, 2015), (Jorne et al., 2012a), (Jorne & Henriques, 2013), (Jorne et al., 2015b)], e que precede a análise do desempenho desses *grouts* quando injectados no interior do meio poroso.

## **1.3. Estrutura e organização da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, visando o primeiro capítulo o enquadramento do tema, os objectivos e a estrutura e organização do trabalho.

O segundo capítulo engloba um levantamento acerca do conhecimento já existente baseado em estudos e resultados experimentais. Este capítulo consiste na caracterização do *grout* nos estados fresco e endurecido, indicando, respectivamente, as suas propriedades físicas e químicas, e mecânicas. Igualmente é efectuada uma pesquisa de informação acerca da influência do meio poroso na injectabilidade do *grout* e que efeito possa causar no comportamento do conjunto *grout*/meio poroso.

No terceiro capítulo inicia-se a apresentação da campanha experimental deste estudo com a identificação e selecção dos diversos materiais utilizados na composição do *grout*, seguida da apresentação dos ensaios laboratoriais referentes à caracterização do *grout* nos estados fresco e endurecido, incluindo a descrição dos equipamentos utilizados. Posteriormente, de igual forma são



identificados os materiais que constituem os meios porosos, e são descritos os ensaios complementares à sua caracterização, assim como quando em conjunto com o *grout*, quer no estado fresco, quer no estado endurecido.

O quarto capítulo incide na apresentação dos resultados obtidos na primeira fase da campanha experimental, ou seja, no estudo da composição do *grout*. É efectuada uma análise dos resultados dos ensaios realizados antes e após a injeção de *grout*, primeiramente relativa aos ensaios do *grout* nos estados fresco e endurecido, e posteriormente com o *grout* em conjunto com o meio poroso, através dos ensaios de injeção, dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e tomografia ultrasónica, e dos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral.

O quinto capítulo dá seguimento à primeira fase da campanha experimental, no qual são apresentados os resultados obtidos na segunda fase da campanha referentes ao estudo da redução do efeito de sucção do meio poroso, onde são efectuados alguns dos ensaios mencionados acima de modo a averiguar o melhoramento do método adoptado.

No sexto capítulo sintetizam-se as conclusões do trabalho e sugerem-se alguns desenvolvimentos futuros no contexto da temática abordada no presente trabalho.

Por último, apresenta-se a bibliografia.

## 2. ANÁLISE DO CONHECIMENTO

### 2.1. Técnica de injeção de *grout*

A injeção de *grout* constitui uma das mais comuns e eficazes técnicas aplicadas no reforço e reparação de paredes de alvenaria ou noutros elementos estruturais. Esta técnica de consolidação estrutural consiste no preenchimento de vazios no interior da alvenaria de modo a melhorar o seu comportamento. A injeção do *grout* é realizada a baixa pressão ou apenas com recurso à acção da gravidade através de furos previamente realizados na alvenaria. Após o endurecimento do *grout* introduzido, a alvenaria recupera o seu comportamento monolítico e a sua resistência mecânica global (Ignoul et al., 2005). Trata-se de uma solução de reforço passiva, que permite recuperar a coesão, continuidade e resistência das estruturas danificadas, sem alterar contudo a sua morfologia nem o sistema de suporte de carga. O preenchimento adequado de vazios, fendas ou fissuras na alvenaria, a capacidade de ligação entre panos opostos de uma parede e a homogeneização das diferenças entre as propriedades mecânicas dos panos exteriores e interiores, constituem as principais características desta técnica de intervenção. Constitui-se como uma solução de carácter irreversível, visto não permitir remover ou substituir o material depois de injectado na parede de alvenaria. Sendo uma solução que altera de forma definitiva a estrutura da parede, a sua utilização deve, portanto, ser muito cuidadosa.



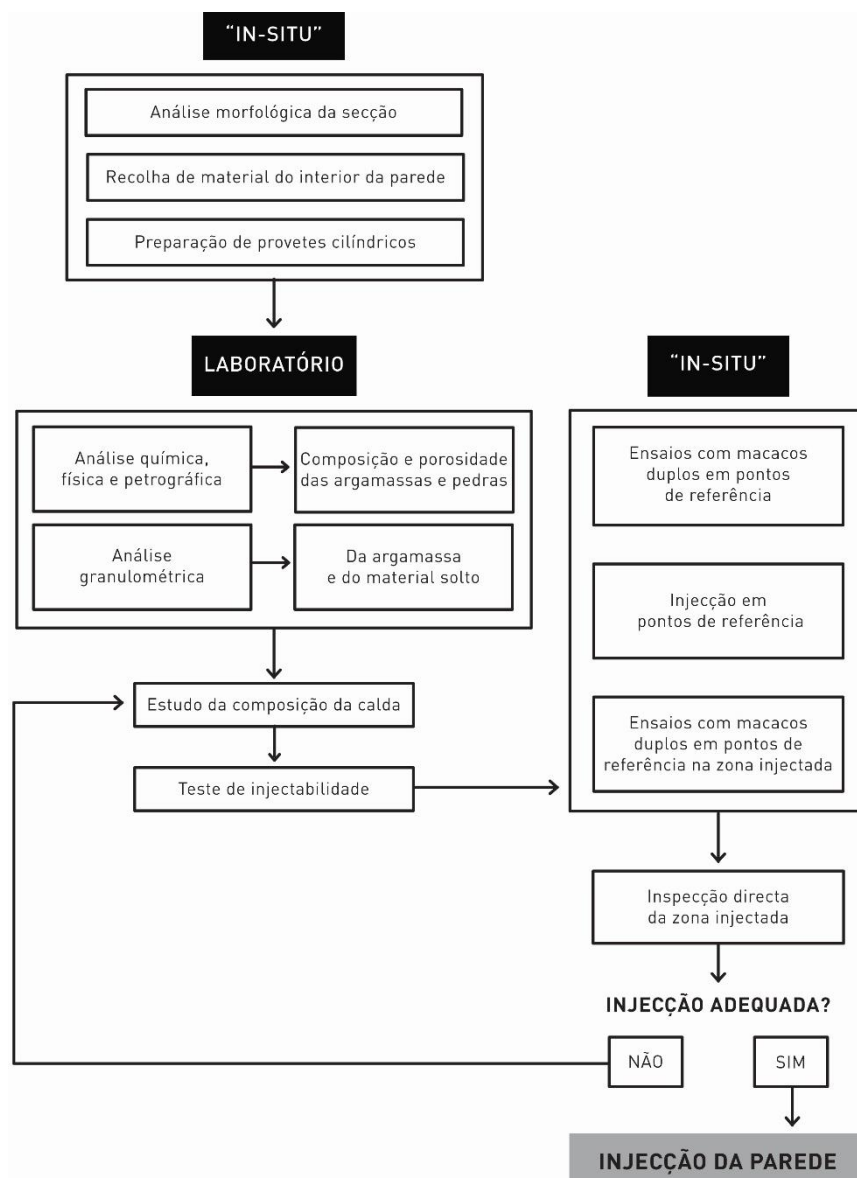
Figura 2.1 – Injeção de *grout* em alvenaria (Brás, 2011)

Para além da irreversibilidade a utilização desta técnica poderá originar eventuais problemas, que podem ser resumidos no seguinte (Binda et al., 2006):

- Falta de conhecimento da distribuição de vazios no interior da parede;
- Dificuldade de penetração do *grout* em aberturas inferiores a 2-3 mm;
- Dificuldade na escolha da distribuição granulométrica das partículas do *grout*, devido à presença de vazios na parede de dimensões variadas;
- Segregação e retracção do *grout*, devido à rápida absorção de água dos materiais existentes na parede;

- Necessidade de injeção a baixa pressão de modo a eliminar a presença de ar nos vazios e mesmo evitar a rotura da alvenaria;
- Dificuldade de penetração do *grout* especialmente na presença de materiais porosos.

De modo a minimizar estes problemas supracitados, deve ser previamente realizado um diagnóstico e uma análise estrutural pormenorizada, bem como a caracterização física e química das paredes. O esquema representado na figura 2.2 resume o procedimento de aplicação da técnica de injeção com o intuito de avaliar a injectabilidade da parede de alvenaria e verificar a eficácia da intervenção. Ensaios não-destrutivos, como ensaios sónicos, poderão ser realizados “in situ”, antes e depois da injeção de modo a detectar a penetração e difusão do *grout*. Estes ensaios possuem a grande vantagem de não introduzir qualquer alteração neste tipo de estruturas, o que do ponto de vista mecânico é muito importante, principalmente em estruturas com algum dano.



**Figura 2.2 – Procedimento esquemático para aplicação da técnica de injeção de paredes de alvenaria (adaptado de (Binda et al., 2006))**

### 2.1.1. Noção de *grout*

As argamassas constituem um material de construção sobejamente conhecido e podem ser classificadas segundo o seu emprego, tipo de ligante utilizado, ou ainda segundo a sua dosagem e até consistência. Em geral, quando não se utilizam agregados (*filler* ou areias) na sua composição o material denomina-se de calda (*grout*) (Luso, 2012).

Segundo a sua consistência, as argamassas classificam-se, em termos genéricos, em secas, plásticas e fluídas. Estas últimas, devido à sua fluidez (quando se encontram no estado fresco) e ao seu elevado poder de penetração, têm vindo a ser usadas em trabalhos de reparação e consolidação, pois têm a capacidade de preencher com alguma facilidade os espaços vazios, nomeadamente, fissuras ou fendas e juntas entre materiais. Estas argamassas são normalmente aplicadas por injeção sob pressão controlada, daí a sua denominação mais corrente – argamassas de injeção (Luso, 2012). Toumbakari propõe a seguinte definição: “Uma calda ou *grout* de injeção é uma argamassa utilizada no preenchimento, homogeneização, consolidação e/ou melhoria das propriedades mecânicas de sistemas que apresentem cavidades, vazios, fendas ou falta de coesão ou de sistemas totalmente não coesos” (Toumbakari, 2002). Esta definição deixa em aberto a opção de escolha dos materiais constituintes das misturas assim como as suas propriedades, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, para cada situação particular.

Numa visão mais concreta pode definir-se o *grout* como uma suspensão aquosa constituída por ligantes, água e eventuais aditivos. O cimento ou a cal constituem o ligante do *grout*, podendo ser adicionados outros produtos, como por exemplo superplastificantes, que permitem obter *grouts* mais estáveis e mais fluidos para a sua injeção. O *grout* deve ter como características reduzida viscosidade e elevada penetrabilidade. As especificações do *grout* envolvem um conhecimento profundo sobre a capacidade de escoamento dentro do núcleo da alvenaria e a compatibilidade física e química dos materiais existentes nas edificações históricas (Jorne et al., 2015b).

Um dos principais critérios para a escolha do ligante na avaliação e estudo da composição do *grout* consiste na verificação de potenciais problemas de incompatibilidade com os materiais das paredes originais, que podem comprometer o desempenho de todo o processo de consolidação. Segundo alguns autores [(Binda et al., 1997), (Brás & Henriques, 2012), (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012), (Valluzzi et al., 2004), (Valluzzi, 2005), (Vintzileou, 2006)], ligantes naturais de cal hidráulica fornecem *grouts* potencialmente mais compatíveis devido à semelhança química e às propriedades física e mecânica dos materiais históricos, quando comparados com aqueles à base de cimento puro ou resinas orgânicas (Van Rickstal, 2000), incrementando assim a sua durabilidade. A presa e o endurecimento da cal hidráulica compreende duas reacções. A primeira correspondente à hidratação dos silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio ao ar e submerso em água, e a segunda é dada pela recarbonatação da cal apagada apenas na presença de dióxido de carbono (Matos, 2013). Apesar de não possuírem o problema do endurecimento lento, as caldas à base de cimento apresentam algumas

desvantagens em termos de compatibilidade com os materiais de suporte. Estes problemas são a principal causa de recusa da sua utilização em suportes antigos. No caso da utilização exclusiva de cal aérea, a elevada espessura das paredes de alvenaria dos edifícios antigos leva à existência de um baixo teor de dióxido de carbono no seu interior, o que faz com que o processo de carbonatação da cal seja lento e, conseqüentemente, o endurecimento seja muito demorado. Esta contrariedade revela-se o principal entrave à aplicação de caldas de injeção exclusivamente à base de cal aérea, apesar desta ser a mais compatível entre as restantes cals. Como solução a este problema pode ser adicionado material pozzolânico (por exemplo cinzas volantes ou sílica de fumo), desde que em pequenas proporções. Outra alternativa válida consiste em utilizar caldas bastardas de cal aérea hidratada e cal hidráulica.

A concepção do *grout* deve obedecer a uma série de requisitos para um adequado desempenho a nível de injectabilidade, resistência e durabilidade de alvenarias antigas. Estes requisitos, descritos no quadro 2.1, estão na base de uma abordagem geral da estrutura a ser reparada, antes e depois da intervenção (ou seja, o tipo de construção e dimensões da estrutura, a natureza dos materiais existentes, a largura mínima nominal dos vazios, a eventual existência de sais solúveis, o comportamento desejado após a reparação, etc.) (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

**Quadro 2.1 – Resumo dos requisitos para assegurar a qualidade das caldas de injeção (adaptado de (Binda et al., 1997))**

<b>Requisitos Reológicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pretende-se fluidez durante o processo de injeção e capacidade de penetração uniforme de modo a que haja um completo preenchimento dos vazios de igual forma (injectabilidade – propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.);</li> <li>– Ausência de segregações (para evitar heterogeneidades);</li> <li>– Exsudação deve ser mínima (para diminuir presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido).</li> </ul>
<b>Requisitos Químicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Deve ter características químicas estáveis no tempo, isto é, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reacções irreversíveis;</li> <li>– Deve ter resistência aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências.</li> </ul>
<b>Requisitos Físicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– O tempo de início de presa deve ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção;</li> <li>– As propriedades higroscópicas devem ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade;</li> <li>– Deve possuir baixa retracção.</li> </ul>
<b>Requisitos Mecânicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Deve ter características mecânicas e de rigidez similares aos materiais originais ou apenas ligeiramente superiores;</li> <li>– Deve ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto.</li> </ul>

## 2.2. Estudo do *grout*

### 2.2.1. Propriedades do *grout* no estado fresco

O *grout* deve possuir a capacidade de fluir no interior do meio poroso a ser injectado, o que significa que existe a necessidade de controlo de qualidade. O comportamento de um *grout* no estado fresco depende da maior ou menor quantidade de água utilizada na amassadura. A água deve permitir que a mistura seja injectada mas não deve exceder valores que alterem excessivamente as propriedades da mistura. Assim, a relação água/ligante na composição do *grout* revela-se um parâmetro fundamental para um bom comportamento de injeção. Segundo Toumbakari (Toumbakari, 2002), para uma relação água/ligante elevada, os *grouts* são fluidos praticamente newtonianos, uma vez que a viscosidade é constante para qualquer tensão a que seja submetida. Ao diminuir a relação água/ligante, o comportamento do *grout* torna-se gradualmente reofluidificante, passando a viscosidade a ser variável em função da tensão aplicada. De acordo com os valores da relação água/ligante normalmente utilizados, considera-se que o *grout* é um fluido com um comportamento reofluidificante (também designado por fluido binghamiano), recorrendo-se aos modelos de Bingham e de Herschel-Bukley para a avaliação do seu comportamento [(Brás, 2011), (Baltazar et al., 2013b)].

O estudo das propriedades do *grout* no estado fresco, tais como a fluidez, estabilidade (segregação/exsudação) e capacidade de retenção de água, entre outras, permite caracterizar o comportamento deformacional do *grout*. É importante salientar que as propriedades supracitadas estão, de algum modo, entre si relacionadas. Por um lado, a estabilidade depende de dois fenómenos que se relacionam, tais como o início da segregação e o aparecimento da exsudação. Estas últimas, como influenciam a homogeneidade da mistura, implicam alterações na viscosidade do *grout*, ou seja na fluidez. Assim, está também dependente da concentração volumétrica da parte sólida e da granulometria do ligante utilizado (Luso, 2012). Refira-se que, a realização de cada ensaio em particular na análise destas propriedades não é suficiente para caracterizar o comportamento reológico do *grout*, uma vez que cada um deles permite apenas determinar um só parâmetro. Deste modo, para um estudo complexo do *grout* fresco, é necessária a realização de vários ensaios que permita em cada um deles avaliar as propriedades do *grout*.

Seguidamente, apontam-se algumas das propriedades mais importantes utilizadas no estudo do *grout* fresco.

#### i) Fluidez

Os *grouts* apresentam características de escoamento diferentes, dependendo da sua aplicação. Portanto, não é surpreendente que uma das propriedades mais discutidas seja a fluidez, ou trabalhabilidade do *grout*. A fluidez traduz-se na capacidade do material permanecer no estado fluido

por tempo suficiente enquanto ocorre a difusão homogênea das cavidades (Valluzzi, 2000). Para uma injectabilidade adequada, é importante garantir que o *grout* tenha facilidade de fluir através das fissuras e vazios da alvenaria, com mínimas perdas de pressão possíveis durante todo o processo de injeção. Esta propriedade depende fundamentalmente da distribuição granulométrica, da natureza, forma e superfície específica das partículas, da quantidade de água de amassadura e do método de mistura do *grout* (Vintzileou, 2006).

O comportamento reológico do *grout* fresco surge associado à fluidez, uma vez que possui uma grande importância na injectabilidade do *grout*. Entenda-se reologia como a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos materiais (Bingham, 1929). Do ponto de vista reológico, a avaliação da capacidade de escoamento do *grout* pressupõe a determinação de pelo menos duas grandezas fundamentais: a tensão de cedência e a viscosidade plástica do *grout* de injeção.

A tensão de cedência, ou tensão limite de escoamento, está associada à mínima tensão que é necessária aplicar à suspensão para que esta comece a fluir. Na prática, pode afirmar-se que a tensão de cedência corresponde à capacidade de enchimento do *grout* e ao facto de este fluir ou não quando sujeito a uma tensão aplicada. Esta grandeza permite perceber a facilidade com que o *grout* se começa a deformar, uma vez que representa o valor crítico necessário para que tal se verifique (Roussel, 2007). Trata-se de uma grandeza particularmente importante na influência do comportamento do escoamento do *grout* e na sua capacidade de atravessar o meio poroso.



**Figura 2.3 – Representação do efeito da injeção de *grouts* com maior e menor tensão de cedência (adaptado de (Brás, 2011))**

Por outro lado, a viscosidade plástica representa a resistência ao fluxo quando este é iniciado. Por outras palavras, a viscosidade plástica pode ser associada à velocidade a que um determinado *grout* irá fluir após o início do escoamento. Uma viscosidade plástica baixa significa que a suspensão flui facilmente, ao passo que uma viscosidade plástica elevada o fluxo será mais difícil, pois resulta de interações coloidais excessivas entre as partículas em suspensão (Baltazar et al., 2013b). Tal como a tensão de cedência, a viscosidade plástica tem como função controlar a qualidade do *grout* fresco, permitindo diferenciar *grouts* facilmente trabalháveis daqueles que apresentam grande resistência ao escoamento, ou seja, mais difíceis de serem bombeados. Apesar do comportamento reológico do *grout* não ser alvo de estudo da presente dissertação, é importante ter uma noção destas duas grandezas na medida em que estas afectam o seu desempenho durante a injeção.

Os *grouts* de injeção à base de cal hidráulica possuem um comportamento reológico muito complexo, que se altera ao longo do tempo devido ao seu processo de hidratação bem como de alteração da viscosidade. Aplicando uma taxa de corte sobre um fluido, a viscosidade e a tensão de corte podem aumentar ou diminuir com o tempo, causando alterações reversíveis ou irreversíveis na estrutura do fluido. A um desses comportamentos chama-se tixotropia, que pode ser associada ao comportamento de *grouts* à base de cal hidráulica, desde que num curto intervalo de tempo (Baltazar et al., 2014). Este comportamento caracteriza-se por uma diminuição gradual da viscosidade quando sujeito a uma tensão de corte, seguido da recuperação da estrutura inicial após retirada da tensão (Almeida et al., 2012). Assim sendo, pode afirmar-se que para este comportamento tixotrópico do *grout* as alterações que nele se estabelecem são reversíveis, visto que as ligações entre as partículas de ligante ainda não são significativas. Isto é, o ciclo de floculação/desfloculação do *grout* processa-se de forma eficaz. No entanto, com o passar do tempo verifica-se um aumento da viscosidade e da tensão de cedência do *grout*, até este deixar de se comportar como uma suspensão. Convém, igualmente, ter este conceito presente quando se tem em conta o tempo e se analisa a variação do comportamento do *grout* no seu estado fresco.

## ii) Estabilidade

A estabilidade de um *grout* constitui um objectivo fundamental na garantia das mesmas propriedades em todos os locais no seio do material quando este evolui do estado fresco para o estado endurecido (Toumbakari et al., 2005). Neste contexto, a estabilidade consiste na capacidade de uma mistura de *grout* em manter uma distribuição uniforme de partículas durante o processo de injeção e após a conclusão de todas as operações de posicionamento e de injeção da mistura dentro do meio poroso. Pela sua natureza, o *grout* consiste num conjunto de partículas sólidas (de ligante) dispersas em água, no qual existe uma conectividade do conjunto de canais de dimensões variadas por onde a água tem possibilidade de circular. Após o processo de mistura, as partículas sólidas distribuem-se consoante um conjunto de forças gravitacionais e de fricção, assim como de forças de ligação entre as partículas. No entanto, existe a probabilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade, tais como a exsudação e a segregação.

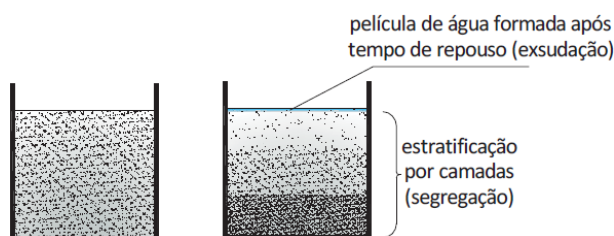
Relativamente ao fenómeno de exsudação, este traduz-se na migração das partículas de água para a superfície da suspensão do *grout*, criando uma película de água superficial. Numa situação inicial deste fenómeno, as forças de ligação entre as partículas sólidas são ainda suficientemente fortes para manter a microestrutura do *grout*. Contudo, numa situação mais avançada onde exista uma exsudação excessiva, eventualmente devido à relação água/ligante utilizada e/ou à distribuição granulométrica do ligante, este fenómeno pode resultar numa suspensão de *grout* heterogénea, tornando-a incapaz de penetrar eficazmente no meio poroso e que exista uma boa aderência entre os materiais (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013). Após o processo de cura do *grout*, a evaporação dessa



quantidade de água que se encontra à superfície poderá dar origem ao aparecimento de vazios, o que é prejudicial para a resistência mecânica da estrutura.

Tal como o fenómeno de exsudação, a segregação está dependente da quantidade de água utilizada e está intrinsecamente ligada à forma, dimensão e massa volúmica das partículas do *grout* (Laeffer et al., 1996). Este fenómeno consiste numa mais rápida disposição das partículas e/ou de aglomerados de partículas de ligante, existindo uma tendência para estas se instalarem de uma forma estratificada na suspensão de *grout*. Neste caso, as forças existentes entre as partículas são incapazes de manter a microestrutura do *grout*, existindo uma variação da massa volúmica da suspensão em função da altura, o que é prejudicial na injeção de *grouts* (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

Na figura 2.4 encontram-se representados os dois fenómenos de instabilidade do *grout* referidos.



**Figura 2.4 – Representação esquemática dos fenómenos de exsudação e segregação (Luso, 2012)**

No que diz respeito à estabilidade de uma injeção de *grout*, deve-se portanto evitar a segregação de partículas sólidas ou exsudação excessiva pois, caso contrário, poderá ocorrer um bloqueio e a qualidade da injeção ser fortemente afectada (Valluzzi, 2005). Essas instabilidades comprometem a injectabilidade de um *grout*, nomeadamente por falta de preenchimento dos vazios, adesão heterogênea, características de fraca resistência e, consequentemente, baixa durabilidade (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013).

### ***iii) Retenção de água***

A capacidade de retenção de água é uma outra propriedade importante a ser assegurada na potenciação da injectabilidade do *grout*, uma vez que representa a capacidade de um *grout* em reter a água da mistura, durante a injeção no interior de alvenarias secas e de elevada absorção. A capacidade de reter a água o máximo tempo possível no interior da suspensão de *grout* irá permitir manter um bom comportamento reológico e estabilidade do *grout*, a fim de garantir uma injeção eficaz (Assaad & Daou, 2014).

A perda de água da constituição do *grout* dentro da alvenaria pode formar um mecanismo de bloqueio no processo de injeção [(Brás & Henriques, 2012), (Van Rickstal, 2000)] devido ao aumento do atrito interno e colisão entre as partículas sólidas, levando a uma diminuição do grau de

dispersão e, portanto, uma redução da capacidade de injeção (Assaad & Daou, 2014). Um elevado teor em água pode resolver os problemas de fluidez e de injectabilidade (Rosquoët et al., 2003), mas também conduz a suspensões menos estáveis, com maior probabilidade de ocorrência de fenómenos como a segregação e exsudação (Biçer-Şimşir et al., 2009). Além disso, pode também levar a um aumento da porosidade total e consequentemente, a uma diminuição da resistência mecânica assim que o *grout* fique no estado endurecido. Portanto, o aumento do teor em água não é a solução mais indicada. É mais adequado injectar um *grout* com uma boa capacidade de reter a água da mistura (Uranjek & Bosiljkov, 2012). Esta propriedade agora mencionada irá revelar-se de extrema importância no estudo do *grout* durante o processo de injeção, como se verá mais adiante na presente dissertação.

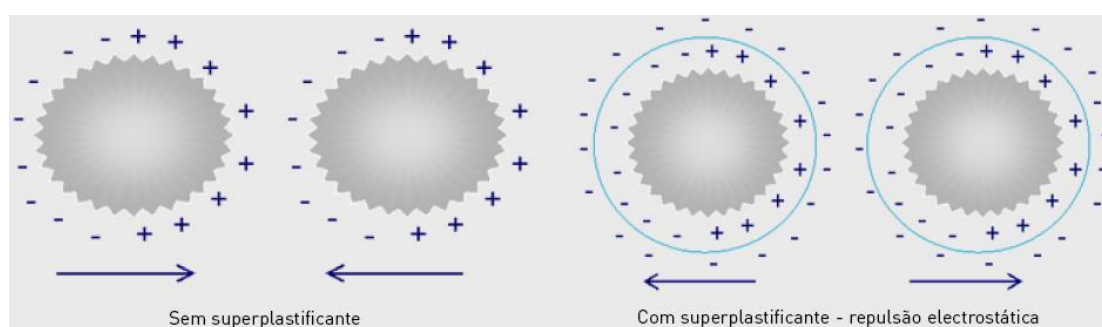
### 2.2.2. Superplastificantes

Os *grouts* por definição são misturas de ligante e água. No entanto, essas misturas são simples e menos capazes de realizar uma eficiente consolidação, sendo necessário a utilização de produtos adicionais. De acordo com alguns autores [(Baltazar et al., 2012a), (Baltazar et al., 2013a), (Eriksson et al., 2004), (Fernandèz-Altable & Casanova, 2006)], as propriedades do *grout* no estado fresco podem ser melhoradas com a adição de adjuvantes na sua composição. Estes são adicionados em quantidades muito reduzidas com o objectivo de modificar as propriedades do sistema água/ligante (Banfill, 2011).

Uma grande variedade de factores desempenha um papel significativo no comportamento do *grout* fresco, tais como: o tipo de ligante, a relação água/ligante, o tipo e dosagem de superplastificante e aditivos como a sílica de fumo. Relativamente a esta última, apesar da sua utilização ser vantajosa na capacidade de retenção de água (pois as partículas de sílica de fumo conferem uma superfície específica adicional à suspensão), apresenta um efeito negativo no comportamento reológico de um *grout* à base de cal hidráulica [(Baltazar et al., 2013a), (Baltazar et al., 2014), (Brás & Henriques, 2009)]. Assim, neste trabalho resolveu-se estudar unicamente o efeito do superplastificante na composição do *grout*, bem como a sua influência na capacidade de injeção dentro do meio poroso.

O superplastificante é um adjuvante que, sem modificar a sua consistência permite reduzir fortemente a dosagem de água de uma solução de *grout*, ou, sem modificar a dosagem de água aumentar consideravelmente a sua fluidez, ou produzir os dois em simultâneo. O teor de água/ligante origina um comportamento semelhante à utilização do superplastificante. Refira-se que água livre que se encontra na composição do *grout* é o elemento proporcionador da sua fluidez, contudo a simples adição com o intuito de o tornar mais fluido (ou mais injectável) é considerada uma opção inadequada, pois uma relação água/ligante elevada irá contribuir para um efeito negativo no *grout* após o tempo de

cura, e poderá dar origem à ocorrência de fenómenos de retracção. Além disso, se a quantidade de água livre que fica na suspensão for em demasia pode contribuir para os tais fenómenos de instabilidade já referidos (Baltazar & Henriques, 2015). Assim, para uma melhor compreensão do uso do superplastificante é necessário perceber qual a sua principal finalidade e os seus efeitos no conjunto água/ligante. O objectivo dos superplastificantes passa por promover a dispersão dos finos da mistura, permitindo diminuir significativamente a quantidade de água livre na amassadura. Por outras palavras, este grau de dispersão causado pela adição do superplastificante permite que mais partículas de ligante sejam molháveis (mais água é adsorvida na superfície da partícula) e, por conseguinte, se encontre menor quantidade de água livre (Biçer-Şimşir et al., 2009). Com efeito, havendo menos água livre de circular na suspensão, consequentemente esta é absorvida pelas partículas do meio poroso em menor quantidade, o que significa que existe uma melhoria da capacidade de retenção de água do *grout*. Pode, portanto, afirmar-se que as propriedades dispersantes permitem desflocular a pasta de cimento ou à base de cal hidráulica, melhorando assim o comportamento reológico do *grout*. Trata-se de um adjuvante dispersante cuja principal acção se baseia em forças de repulsão (Baltazar et al., 2012a). De um ponto de vista químico, um superplastificante é um agente de superfície activo que actua sobre as partículas de ligante através de cargas electrostáticas, e/ou que aglomera longas cadeias de polímeros sobre as partículas, criando uma repulsão entre eles [(Martins & Bombard, 2011), (Wallevik, 2009), (Yamada et al., 2000)]. Esta acção de repulsão dupla, através da combinação de efeitos electrostáticos e impedimento estérico, aumenta a distância média entre as partículas e, portanto, diminui a magnitude das forças atractivas de Van-der-Waal's. Como tal, a floculação das partículas é reduzida ou mesmo impedida (Vikan, 2005). Na figura 2.5, pode visualizar-se a diferença de comportamento dos aglomerados das partículas de ligante com a presença do superplastificante, verificando-se os mecanismos que promovem a desfloculação dos aglomerados das partículas de ligante.



**Figura 2.5 – Esquema representativo do efeito do superplastificante sobre as partículas de *grout* (Guerreiro, 2014)**

Deste modo, por acção do superplastificante é previsível uma melhoria do comportamento reológico do *grout* de injeção através da redução da viscosidade plástica e da tensão de cedência. A tensão de cedência e, em menor extensão, a viscosidade plástica diminuem com o aumento da concentração de superplastificante. Assim, com o uso de superplastificantes conseguem-se tensões de

cedência muito baixas devido à dispersão das partículas. No entanto, acima de uma certa concentração de superplastificante não são perceptíveis ganhos significativos na fluidez do *grout*. Essa concentração entende-se por dosagem ótima ou de saturação. Além disso, pode também causar efeitos negativos no aumento do volume de vazios e afectar a boa resistência do produto final (Matos, 2013). Assim, é necessário compreender qual a quantidade de superplastificante a utilizar, traduzindo-se na optimização da dosagem de superplastificante.

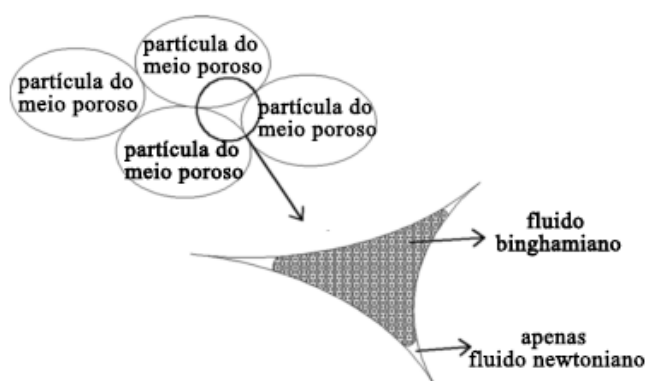
### **2.2.3. Propriedades do *grout* no estado endurecido**

Tal como o estudo das propriedades do *grout* no estado fresco, também o estudo das propriedades do *grout* no estado endurecido se revela de grande importância. Apesar das propriedades do *grout* fresco terem um papel preponderante no sucesso da injeção e, consequentemente, no desempenho da intervenção de consolidação, o comportamento mecânico dos *grouts* após presa também deve ser tido em conta. Os *grouts* destinados a estabilização de alvenarias de panos múltiplos vão estar sujeitos a diferentes tipos de esforços (nomeadamente à compressão, corte e tracção), portanto, é de todo relevante o estudo do comportamento do *grout* endurecido com especial relevância para as resistências mecânicas. Assim, no presente trabalho apenas se determinaram as resistências à flexão e à compressão de provetes de *grout*, de modo a ter uma noção da sua capacidade de resistência como material isolado (independentemente do meio poroso). Contudo, o estudo das propriedades do *grout* no estado endurecido adquire ainda um maior grau de importância se for considerado juntamente com a estrutura de suporte, o meio poroso. As características mecânicas do *grout* deverão contribuir para uma melhoria da coesão e da resistência mecânica do suporte (Jorne et al., 2015b). Por outro lado, esta contribuição não deve ser desproporcional ao que já existe. Caso seja necessário aumentar a resistência mecânica do conjunto, esta não deve incrementar muito a sua rigidez (módulo de elasticidade não deve ser elevado), garantindo desta forma a compatibilização mecânica e física.

### **2.3. Influência do meio poroso na injectabilidade do *grout***

Entenda-se um material poroso como um sólido que contém vazios ou poros, interligados ou não, dispersos de forma regular ou aleatória (Van Rickstal, 2000). Consoante a distribuição granulométrica das partículas que constituem o meio poroso de cada material existem diferentes permeabilidades que, por sua vez, conduzem a injectabilidades distintas. Nos meios porosos estudados existem dois tipos de vazios distintos passíveis de serem penetrados pela suspensão de *grout*: os vazios referentes ao interior das partículas constituintes do meio poroso e os vazios situados entre elas, sendo designados como os espaços intraparticular e interparticular, respectivamente (Coelho, 2013). No

entanto, como já mencionado anteriormente, sendo a suspensão de *grout* considerada um fluido não newtoniano (ou fluido binghamiano, quando avaliado de acordo com o modelo de Bingham), esta não possui a mesma capacidade de penetração que de um fluido newtoniano, como é o caso da água. Numa situação de existência de poros no interior das partículas do meio poroso de dimensão inferior à granulometria das partículas de ligante, estas tornam-se incapazes de preencher completamente os vazios existentes desse espaço (intraparticular), penetrando apenas a componente líquida da suspensão de *grout*, isto é, a sua água constituinte. Assim, não é possível uma penetração efectiva desse espaço por parte da componente sólida do *grout*, esta apenas considera uma penetração de carácter superficial. No entanto, o *grout* sendo um fluido binghamiano, apresenta ainda em certos casos dificuldade de penetrar também no espaço interparticular devido às características das partículas do meio poroso (Jorne et al., 2015b). A fricção causada pela rugosidade das partículas do meio poroso, as ligações electrostáticas entre as partículas de ligante e o fenómeno de floculação devido a hidratação imediata das partículas de ligante de tamanho inferior (formação de pequenos aglomerados) são as principais causas para a tal dificuldade de penetração do *grout* nas zonas de vazios com menor dimensão, perceptível na figura 2.6.



**Figura 2.6 – Área disponível entre as partículas do meio poroso para um fluido newtoniano (água) e para um fluido binghamiano (*grout*) (Jorne et al., 2015b)**

A estrutura porosa que compõe os diversos materiais pode ser caracterizada por diferentes propriedades que, por sua vez, determinam a maior ou menor penetrabilidade do *grout*. Entre outras, as que mais se destacam são a porosidade, a porometria e a distribuição do tamanho dos poros. A porosidade, também designada por volume de vazios, é a fracção do volume aparente que corresponde aos poros. A porometria refere-se ao tamanho dos poros que constituem o meio poroso. Naturalmente, de acordo com a sua granulometria, cada meio poroso apresenta variabilidades na distribuição dos vazios e poros. O modo como os vazios se interligam, ou seja, a sua conectividade, influenciam o caminho que o *grout* tem de percorrer para preencher o máximo de volume de vazios possível. Verifica-se, portanto, que é relevante possuir um bom conhecimento das partículas do meio poroso bem como o seu efeito no comportamento do *grout* quando este é injectado, de modo a melhor

compreender globalmente o processo de injeção.

A qualidade de uma injeção é avaliada do ponto de vista da injectabilidade do *grout*, que traduz a capacidade de escoamento da mistura e de manutenção dessa característica por um período de tempo que permita uma injeção fácil e eficiente do elemento injectado. Como já mencionado em 2.2.1, analisando a capacidade de escoamento do *grout* independentemente da estrutura de suporte, apenas se garante fluidez do *grout* se a tensão exercida sobre o *grout* for superior à tensão de cedência. No entanto, a eficácia de uma injeção de *grout* depende não só das características da mistura, mas também do conhecimento do tipo de parede (Valluzzi, 2005). Assim, o estudo do fluxo de fluidos através do meio poroso revela-se de extrema importância na injeção do *grout*.

Quando um *grout* é injectado num meio poroso seco ocorre um fenómeno de absorção rápida da água da sua constituição pelos poros de menores dimensões, o que origina um aumento rápido da viscosidade do *grout* e leva a que deixe de fluir (Jorne et al., 2015b). Este rápido fenómeno de absorção da parte líquida do *grout* pelas partículas do meio poroso caracteriza-se por um conjunto de forças de sucção, que depende essencialmente de dois factores:

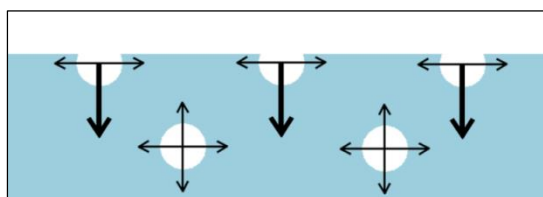
- Das características do fluido, isto é, na forma como este molha a superfície, em termos de tensão superficial;
- Das características da superfície, através do ângulo de contacto formado entre esta e o fluido.

Ambos os conceitos referentes a cada característica são a base do conhecimento deste tipo de comportamento. Deste modo, torna-se fundamental não só compreender os mecanismos associados a estas características, mas também analisar a sua influência no processo de injeção de *grout*, de forma a permitir um melhor conhecimento deste processo e otimizar o desempenho do *grout* dentro do meio poroso.

### **2.3.1. Tensão superficial**

O primeiro mecanismo que é necessário compreender é referente à tensão superficial, característica fundamental no comportamento de um fluido. Este mecanismo pode ser facilmente compreendido analisando, por exemplo, as moléculas de água. As moléculas de água atraem-se entre si devido às ligações que se estabelecem entre os átomos que as constituem (oxigénio e hidrogénio). No caso de uma molécula de água se encontrar integralmente envolta noutras moléculas de água, as forças de atracção existentes entre elas são anuladas, ficando em equilíbrio. No entanto, essas moléculas estão fracamente ligadas às restantes moléculas vizinhas. Se a molécula se encontrar na proximidade da superfície, uma parte das forças de atracção não será compensada, resultando numa força de valor superior às restantes, perpendicular à superfície e no sentido da massa (Henriques, 2011). Isto acontece porque os átomos que se encontram à superfície ligam-se com os átomos da zona

mais interior do líquido. Os átomos da fase gasosa (ar) em contacto com o líquido estando muito dispersos no espaço, interagem muito menos com os átomos da superfície do líquido. Através da figura 2.7, é possível constatar a diferença do comportamento das forças de atracção, quer em equilíbrio (quando se encontram no interior do líquido), quer em desequilíbrio (quando se encontram perto da superfície), onde apenas as forças de atracção na direcção horizontal estão compensadas. Esta situação faz com que as moléculas da superfície tenham em média maior coesão do que do interior, ou seja um maior valor de tensão superficial. Assim, a superfície de um líquido pode ser compreendida como uma fina película que reveste toda a sua extensão.

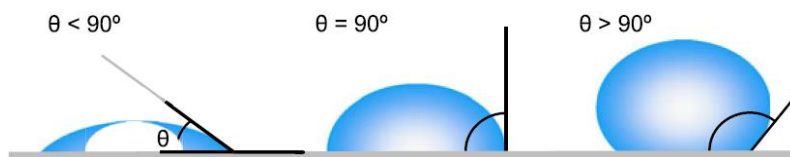


**Figura 2.7 – Mecanismo da formação da tensão superficial em moléculas de água (adaptado de (Henriques, 2011))**

### **2.3.2. Ângulo de contacto**

O ângulo de contacto consiste num importante parâmetro de caracterização de uma superfície. A medição do ângulo de contacto é vista com grande utilidade, pois permite avaliar de uma forma clara a afinidade existente entre uma superfície e um fluido quando ambos ficam em contacto. Conforme o valor do ângulo de contacto ( $\theta$ ), determinado pela inclinação da tangente a uma gota de líquido sobre a superfície em causa, existe uma maior ou menor molhabilidade da superfície (Bracco & Holst, 2013). A molhabilidade é, portanto, a capacidade que um líquido tem de molhar a superfície. Juntamente com a tensão superficial, estes dois parâmetros estão intimamente relacionados, como se verá mais adiante.

Nas zonas de proximidade de um fluido às paredes do poro verificam-se forças de atracção diferentes. Nos casos em que as forças de atracção do fluido às paredes do poro forem superiores do que as forças de atracção entre o fluido e o ar, o ângulo de contacto é  $\theta < 90^\circ$ . Neste caso, o material das paredes do poro designa-se como tendo um comportamento hidrófilo, ou seja, a afinidade existente com a superfície é elevada. Contrariamente, se as forças de atracção do fluido às paredes do poro forem inferiores do que as forças de atracção entre o fluido e o ar, o ângulo de contacto é  $\theta > 90^\circ$  e o material designa-se como tendo um comportamento hidrófobo (Henriques, 2011). Por outras palavras, as forças de coesão do fluido superam as forças de adesão entre este e a superfície e, como tal, deixa de haver um fenómeno de sucção e passa a existir um fenómeno de repulsão na superfície do corpo sólido (menor afinidade).



**Figura 2.8 – Representação dos diferentes ângulos de contacto (Bracco & Holst, 2013)**

Na generalidade dos casos de água sobre materiais de construção correntes considera-se que o ângulo de contacto assume valores próximos de zero ( $\theta = 0^\circ$ ). No entanto, segundo Henriques (Henriques, 2011), se for aplicado um hidrófugo de superfície sobre o material de construção corrente o valor passa a ser  $\theta > 90^\circ$ , e será tanto maior quanto maior a eficácia do hidrófugo aplicado. Ora, isto quer dizer que a sua aplicação irá alterar as características da superfície do material em causa, tornando-o repelente. Neste caso, as forças de atracção do líquido às paredes do poro passam a ser inferiores do que as forças de atracção entre o líquido e o ar. Quimicamente, as superfícies dos materiais correntes apresentam propriedades polares. Estas, ao serem modificadas por um hidrófugo, passam a ter também propriedades apolares (também designadas por não-polares), alterando o seu comportamento face à presença de um fluido. Quanto mais propriedades apolares possuir o material (conferidas pela eficácia de aplicação do hidrófugo), mais este tende a assumir um comportamento hidrófobo.

### 2.3.3. Fenómeno da molhabilidade

A molhabilidade é a capacidade que um líquido tem de molhar uma superfície sólida. Trata-se de um fenómeno que resulta das interacções moleculares entre duas fases de fluidos (tipicamente, um líquido e um gás) e uma superfície sólida (Klein et al., 2012). Existe uma tensão superficial entre um líquido e um sólido, da mesma forma que existe entre dois fluidos imiscíveis. Quando essas duas fases estão em contacto com uma superfície sólida, o equilíbrio entre elas depende dos valores relativos da tensão superficial entre cada par das três fases.

O fenómeno da molhabilidade é geralmente avaliado através do ângulo de contacto formado na interface líquido-sólido e na interface líquido-gás. A interface onde a superfície sólida, o líquido e o gás coexistem é denominada de linha de fronteira (*“three-phase contact line”*, em inglês) (Bracco & Holst, 2013). A forma da gota é alterada à medida que as tensões actuantes nas três interfaces tendem para o equilíbrio. De acordo com o tipo de líquido em causa, a gota pode assumir, no limite, uma forma plana ou esférica, de acordo com o ângulo formado entre as superfícies de interface líquido-sólido e líquido-gás em cada ponto da linha de fronteira. A interacção molecular entre uma gota de um líquido e uma superfície sólida pode ser descrita através da equação de Young (Eq. 2.1), que exprime



o balanço das tensões superficiais para uma gota em equilíbrio na superfície do sólido.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LG}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

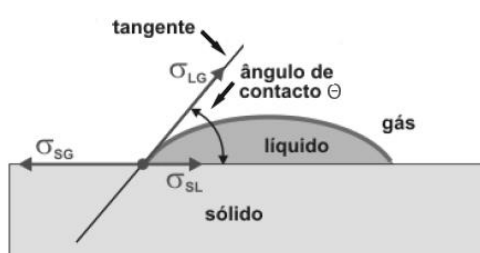
Em que:

$\theta$  – ângulo de contacto;

$\sigma_{SG}$  – tensão superficial entre sólido e gás;

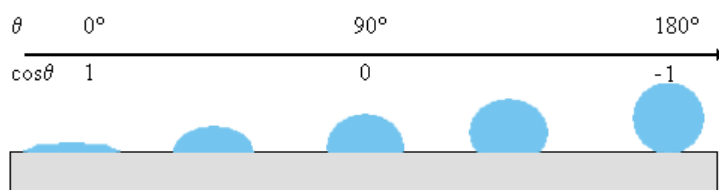
$\sigma_{SL}$  – tensão superficial entre sólido e líquido;

$\sigma_{LG}$  – tensão superficial entre líquido e gás.



**Figura 2.9 – Equilíbrio na linha de fronteira entre uma gota de líquido e a superfície de um sólido (adaptado de (Rato, 2006))**

O ângulo de contacto resulta de um equilíbrio entre as forças de coesão no líquido e as forças de adesão entre o sólido e o líquido. O mecanismo de coesão traduz-se na força de atracção entre as moléculas do líquido, que se atraem entre si. O mecanismo de adesão consiste na força entre as moléculas do líquido e as partículas sólidas. Deste modo, dependendo do equilíbrio entre as forças de coesão e as forças de adesão, irá existir uma maior ou menor molhabilidade da partícula sólida que corresponde a um determinado ângulo de contacto. Na figura 2.10 pode constatar-se essa relação.



**Figura 2.10 – Esquema do processo de molhagem de um sólido por um líquido (adaptado de (Rato, 2006))**

Analisando em simultâneo a equação de Young e a figura 2.10, constata-se que a tensão superficial da interface sólido/líquido iguala a tensão superficial sólido/gasoso ( $\sigma_{SL} = \sigma_{SG}$ ) quando o ângulo de contacto da gota de líquido sobre superfície sólida é  $\theta = 90^\circ$ . Quando o ângulo de contacto é inferior a  $90^\circ$ , a tensão superficial da interface sólido/líquido é inferior à tensão superficial sólido/gasoso ( $\sigma_{SL} < \sigma_{SG}$ ) e o líquido molha o sólido, ou seja, há formação de uma interface sólido/líquido extensa e o líquido tende a espalhar-se sobre a superfície. Por outro lado, quando o

ângulo de contacto é superior a  $90^\circ$ , o líquido tende a assumir um formato esférico, visto que a tensão superficial da interface sólido/líquido é superior à tensão superficial sólido/gasoso ( $\sigma_{SL} > \sigma_{SG}$ ). Assim, o líquido não molha o sólido e a interface sólido/líquido é reduzida. Pode, portanto, afirmar-se que o aumento do ângulo de contacto reduz a molhabilidade, e vice-versa.

#### 2.3.4. Efeito de sucção capilar

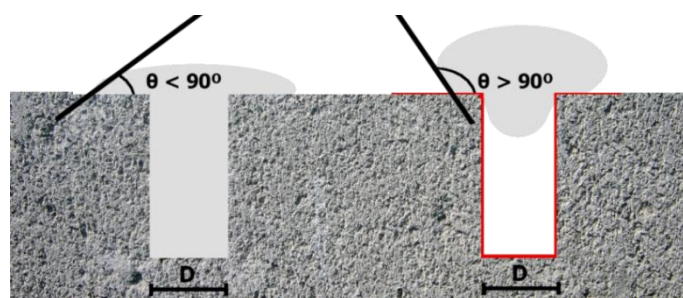
Como já foi referido, quando um *grout* é injectado no interior de um meio poroso seco, este tem tendência a absorver rapidamente a componente líquida do *grout*, causando uma maior resistência ao fluxo de *grout*. Essa absorção depende da sucção que existe nas paredes dos poros, que varia essencialmente consoante a forma e dimensão do poro, como se irá constatar mais adiante. Os mecanismos inerentes à penetração do *grout* por entre as partículas que constituem o meio poroso podem ser facilmente compreendidos recorrendo a um modelo teórico criado por Washburn (Webb & Orr, 1997). Apesar deste modelo ser associado a fluidos não-molhantes (caso do mercúrio), os mesmos conceitos podem ser aplicados no presente estudo. Este modelo consiste na injeção de mercúrio em materiais secos exercendo uma determinada pressão sobre a superfície, no qual se regista o seu volume de intrusão. Quando o mercúrio é colocado em contacto com uma superfície, o facto de este apresentar um comportamento não-molhante, e tal ser traduzido por um ângulo de contacto superior a  $90^\circ$  (na ordem dos  $130^\circ$  a  $140^\circ$  para os diferentes materiais), este sofre repulsão. Sendo o mercúrio caracterizado por uma tensão superficial muito elevada, é necessária uma pressão externa que a supere de modo a permitir a sua penetração (Correia, 2013).

No contexto de meios porosos para injeção de *grout* verifica-se exactamente o oposto. O *grout* sendo um fluido com comportamento molhante ( $\theta < 90^\circ$ ), este quando é colocado em contacto com o meio poroso, tende a ser absorvido pelos seus poros através de um conjunto de forças de sucção ou pressões capilares negativas. Neste caso, as forças de adesão entre as moléculas do fluido (*grout*) e as moléculas da parede do poro superam as de coesão no volume de *grout*, traduzindo uma maior tensão superficial do fluido nessa zona de contacto. Quando essas duas forças atingem o equilíbrio, e assumindo uma geometria cilíndrica para a estrutura porosa (com um diâmetro do poro  $D$ ), obtém-se a sucção capilar ( $S$ ), que provém da equação de Young-Laplace (Eq. 2.2). Note-se que a sucção capilar depende da tensão superficial do fluido  $\sigma$  e do ângulo de contacto  $\theta$  em cada ponto de contacto com a parede do poro.

$$S = \frac{4 \sigma \cos \theta}{D} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Através desta expressão verifica-se que o tamanho do poro e a sucção capilar são duas

variáveis inversamente proporcionais. A equação permite perceber que a sucção capilar que existe na zona de contacto entre o fluido e a parede do poro será tanto maior quanto mais baixos forem os ângulos de contacto e/ou o tamanho dos poros. São precisamente estes poros de menor dimensão sujeitos a maiores pressões capilares (negativas) que causam o efeito de sucção capilar da água da composição do *grout*. Nestas zonas as forças de tensão superficial do fluido são extrapoladas para uma resultante no sentido ascendente, o que significa que existe uma maior ligação das forças de Van-der-Waal's (forças de adesão) às paredes do poro que, consequentemente, resulta numa maior perda de água da composição do *grout*. Assim, o *grout* tende a perder a sua fluidez dando origem a uma diminuição da capacidade de penetração no meio poroso ou, dito por outra forma, há uma maior resistência ao fluxo de *grout* causado pelas partículas do meio poroso. Deste modo, qualquer alteração da superfície dos poros que aumente o valor do ângulo de contacto conduzirá a menores pressões de sucção, tendo em conta um igual diâmetro do poro. A figura 2.11 permite dar a perceber o efeito que a alteração do ângulo de contacto (para um  $\theta > 90^\circ$ ) exerce sobre o *grout* na zona de contacto com a superfície porosa.



**Figura 2.11 – Efeito da alteração do ângulo de contacto sobre o comportamento do *grout* (adaptado de (Groen et al., 2003))**

Como se pode observar na figura 2.11, salienta-se que com o aumento do ângulo de contacto (através da alteração da superfície porosa, conferida pela introdução do tratamento hidrófugo), o *grout* mantém a dificuldade de penetração em poros de diâmetro mais reduzido, dada a dimensão das partículas de ligante ser maior que o diâmetro do poro. Ora, apesar de permanecer esta situação de impossibilidade de penetração nessas zonas, existe a vantagem de uma menor migração de água do *grout* para as paredes do poro, resultante da ausência da pressão de sucção capilar. Como tal, o *grout* é mais capaz de conservar as suas propriedades reológicas, permanecendo-se fluido durante mais tempo no processo de injeção (menor resistência ao fluxo de *grout*). Já no que diz respeito a poros de maior dimensão, tal dificuldade de penetração não se verifica, conseguindo o *grout* atravessar com relativa facilidade.

### 2.3.5. Ligação mecânica do conjunto *grout*/meio poroso

Segundo Vintzileou (Vintzileou, 2009), a ligação entre o *grout* e o meio poroso é tanto química, devido às reacções entre os materiais em contacto ao longo das interfaces, como mecânica. A ligação mecânica é formada por uma interligação mecânica dos produtos de hidratação transferida para os poros superficiais do suporte, neste caso do meio poroso (Reda Taha & Shrive, 2001). Assim, o conhecimento das características do meio poroso, tais como a porosidade, o tamanho dos poros e a rugosidade da superfície, deve estar bem presente no que concerne à ligação *grout*/meio poroso. A rugosidade ou, por outras palavras, a textura das partículas do meio poroso influencia a aderência do ligante à parede do poro, provocando alterações na fluidez do *grout* no estado fresco e posteriormente na compacidade no estado endurecido. Este parâmetro juntamente com outro, a superfície específica da partícula do meio poroso, afecta a quantidade de água da mistura de *grout* e, indirectamente, as variações de comportamento que lhe estão associadas. Quanto mais rugosa e maior for a área da superfície sólida da partícula do meio poroso, maior capacidade tem de absorver a água da mistura de *grout*. De igual forma, como já se viu anteriormente neste capítulo, o teor de água na composição do *grout* também constitui um importante factor, quer no momento de injeção, quer no incremento da resistência mecânica após endurecimento.

Um *grout* que tenha capacidade de molhar a superfície sólida do meio poroso, ou seja, que apresente uma boa molhabilidade, geralmente possui também uma boa afinidade com o meio poroso (Jorne et al., 2014). Ora, sabendo que um baixo ângulo de contacto indica um fluido com boa afinidade com a superfície sólida, isto significa que, no caso de um *grout*, quanto mais baixo ele for melhores ligações são criadas entre as partículas de ligante e as partículas do meio poroso. Mas, por outro lado, a molhabilidade do *grout* está directamente relacionada com a capacidade de retenção do *grout* e tal pode ser visto como um indicador da sua fluidez, uma vez que uma elevada perda de água é um obstáculo à capacidade de penetração do *grout*. Deste modo, no que diz respeito a uma eficácia da injeção de *grout*, deve ser tido em conta que o ângulo de contacto produz um efeito contrário na fluidez do *grout* e na resistência mecânica na interface entre o *grout* e as partículas do meio poroso. Estas tendências opostas referidas podem igualmente verificar-se na figura 2.11, apresentada na secção anterior, e serão também alvo de análise mais adiante na presente dissertação, nomeadamente no capítulo 5.



### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

No presente capítulo define-se a metodologia experimental adoptada e caracterizam-se os equipamentos e materiais utilizados durante a campanha experimental. Assim, começa-se por caracterizar os materiais estudados que apresentam variações, quer a nível de composição do *grout*, quer na granulometria e natureza do meio poroso.

Os ensaios realizados dividem-se em duas grandes categorias. A primeira categoria incide na descrição dos ensaios intrínsecos às propriedades do *grout*, quer no estado fresco, quer no estado endurecido. A segunda categoria consiste na apresentação dos ensaios relacionados com o comportamento do *grout* em conjunto com o tipo de meio poroso, durante e após o momento da injeção.

O trabalho experimental foi realizado nas instalações do Departamento de Engenharia Civil (DEC) e do Departamento de Química (DQ) na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

#### 3.1. Estudo do *grout*

##### 3.1.1. Materiais utilizados na composição do *grout*

O programa experimental foi realizado com *grouts* à base de cal hidráulica, sendo este ligante produzido em Portugal pela Secil Martingança de acordo com a norma europeia EN459-1:2010 e rotulado como HL5. A escolha por este ligante deveu-se ao facto de este apresentar maior compatibilidade mecânica, física e química com os materiais originais das alvenarias históricas comparativamente ao cimento (Jorne et al., 2012a). As propriedades físicas e químicas da cal hidráulica estão listadas no quadro 3.1,

quadro 3.2 e quadro 3.3.

**Quadro 3.1 – Características da cal hidráulica HL5 <sup>a</sup>**

<b>Resistência mecânica à compressão</b>	7 dias $\geq 2,0$ MPa 28 dias $\geq 5,0$ e $\leq 15,0$ MPa
<b>Finura</b>	$90\ \mu\text{m} \leq 15,0\ \%$ $200\ \mu\text{m} \leq 2,0\ \%$
<b>Tempo de presa</b>	Inicial: $> 1\text{h}$ Final: $< 15\text{h}$
<b>Expansibilidade</b>	$\leq 2,0\ \text{mm}$
<b>Cal livre</b>	3,89 %
<b>Perda ao rubro</b>	19,84 %

<sup>a</sup> Como indicado na ficha técnica do fornecedor

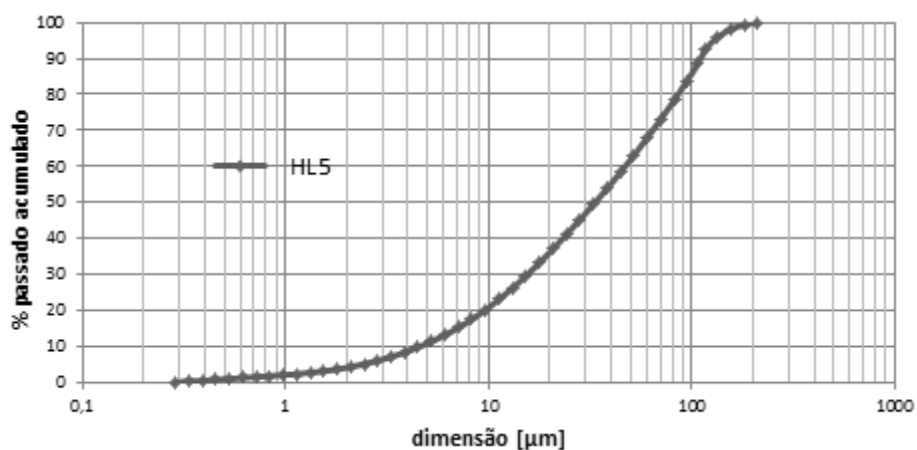
**Quadro 3.2 – Densidade e finura da cal HL5 usando o permeâmetro Blaine (Jorne, 2014)**

Amostra	HL5
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2,7
Finura Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	9400

**Quadro 3.3 – Caracterização química da cal HL5 de acordo com os resultados XRF (Jorne, 2014)**

Nome do composto	HL5
MgO	0,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,96
SiO <sub>2</sub>	10,86
SO <sub>3</sub>	1,97
K <sub>2</sub> O	0,89
CaO	78,97
TiO <sub>2</sub>	0,30
MnO	0,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,96
SrO	0,06
Na <sub>2</sub> O	0,26

A distribuição da granulometria da cal HL5 utilizada no procedimento experimental para caracterização do *grout* é representada na figura 3.1.



**Figura 3.1 – Distribuição da granulometria da cal HL5 (Jorne, 2014)**

Como adjuvante foi utilizado superplastificante com base em policarboxilato (Glenium Sky 617) produzido pela BASF, que possui as características apresentadas no quadro 3.4. Este superplastificante pertence à terceira geração cuja repulsão é uma combinação de efeitos estéricos e electrostáticos acoplados, também conhecida como repulsão electroestérica [(Roussel et al., 2010), (Vikan, 2005)]. A acção de dispersão resultante da repulsão electrostática é obtida a partir da ionização das partículas do ligante com cargas idênticas. Em relação à repulsão estérica, esta surge a

partir do polímero de extensa cadeia lateral que mantém as partículas suficientemente afastadas de modo a que não se consigam unir, ou seja, evita a floculação das partículas do ligante (Wallevik, 2009). Assim, são melhoradas as propriedades reológicas do *grout*, diminuindo a viscosidade plástica e a tensão de cedência (Baltazar et al., 2012b).

**Quadro 3.4 – Características do superplastificante <sup>a</sup>**

<b>Nome comercial</b>	Glenium Sky 617 (BASF)
<b>Função</b>	Reduzir a dosagem de água do <i>grout</i> ; Promover a fluidez do <i>grout</i> ; Evitar a floculação do <i>grout</i> .
<b>Estrutura do material</b>	Policarboxilato
<b>Cor</b>	Castanho
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,05
<b>pH</b>	8
<b>Carga</b>	Aniónica
<b>Teor de iões Cloreto (%)</b>	< 0,10

<sup>a</sup> Como indicado na ficha técnica do fornecedor

Em ordem a avaliar as variações do efeito de superplastificante, as amostras foram injectadas com diferentes composições de *grout*, que se apresentam no quadro 3.5. A designação é feita em função da dosagem de superplastificante (SP) utilizada. Foi utilizada uma relação água/ligante de 0,5 que, de acordo com outros estudos já realizados [(Jorne et al., 2012a), (Baltazar & Henriques, 2015)], corresponde ao valor que apresenta um melhor comportamento a nível de injeção.

**Quadro 3.5 – Composição dos diferentes *grouts* em estudo**

Designação	% de HL5	% de Superplastificante	Relação Água/Ligante
<b>Grout 0,4%SP</b>	100	0,4	0,5
<b>Grout 0,8%SP</b>	100	0,8	0,5
<b>Grout 1,2%SP</b>	100	1,2	0,5

### 3.1.2. Procedimento de mistura

As misturas de *grout* à base de cal hidráulica foram preparadas a uma temperatura ambiente de 20±2°C e a uma humidade relativa de 60±5%. Para a obtenção da suspensão de *grout* foi utilizada água também a uma temperatura de 20±2°C, tendo a cal hidráulica seca sido manualmente misturada de maneira a garantir uma distribuição homogénea antes do início da mistura mecânica. O procedimento de mistura adoptado procedeu-se de modo semelhante a outros trabalhos já realizados sobre o estudo do *grout* [(Baltazar et al., 2012a), (Jorne et al., 2012a)]: é adicionada a quantidade total de ligante a 70% do total de água da mistura e são misturadas durante 10 minutos aproximadamente. A água restante já com o superplastificante diluído é adicionada dentro de 30 segundos, sem parar o



misturador. De acordo com alguns autores [(Aiad, 2003), (Bjornstrom & Chandra, 2003), (Fernandèz-Altable & Casanova, 2006) e (Heikal & Aiad, 2008), (Baltazar et al., 2012b)], o atraso de 10 minutos sobre a adição de superplastificante melhora a eficácia de dispersão das partículas. Na realidade, em fases iniciais de hidratação, uma grande quantidade de fase anidro (“*anhydrous phase*”, em inglês) é gerada muito rapidamente e se o superplastificante estiver presente, alguma parte deste fica parcialmente intercalada (co-precipitação) entre camadas de hidratos, ficando impedindo de exercer a acção dispersante das partículas de ligante [(Flatt & Houst, 2001), (Hanehara & Yamada, 2008)].

Após todos os materiais terem sido adicionados, a mistura foi mantida durante mais três minutos a 2400 rpm. O balde onde foi efectuada a mistura tinha uma capacidade de 5 L, com 177 mm de diâmetro e uma altura de 244 mm. A lâmina utilizada para o procedimento de mistura tinha uma forma helicoidal. Foi dada especial atenção ao procedimento de mistura de modo a evitar a presença de grânulos que possam causar alterações dos resultados experimentais.

### **3.1.3. Ensaios realizados no estado fresco**

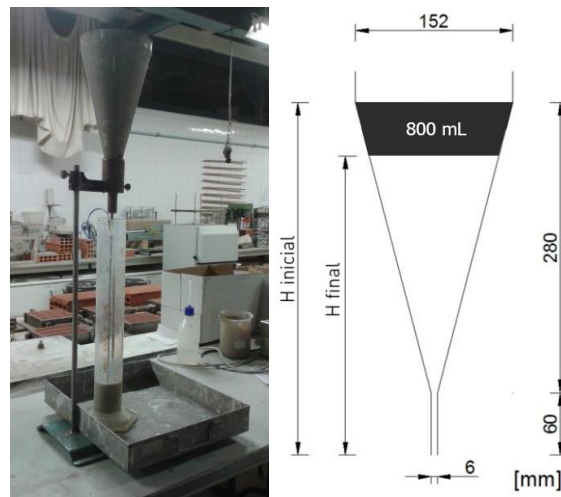
#### **3.1.3.1. Ensaio do cone de Marsh**

De acordo com a norma ASTM C939-02 (American Society for Testing and Materials, 2002a), a medição do tempo de escoamento está relacionada com a fluidez do *grout*, o que significa que quanto maior for o tempo de escoamento menor será a sua fluidez. De salientar que, apesar de não ser possível estabelecer uma relação directa com as características reológicas, o tempo de escoamento constitui-se como sendo um bom indicador da viscosidade do *grout* e, consequentemente, da sua fluidez. Na literatura é geralmente medido por vários tipos de cone, sendo o cone de Marsh o método mais frequentemente utilizado [(Assaad & Daou, 2014), (Baltazar et al., 2014), (Biçer-Şimşir et al., 2009), (Le Roy & Roussel, 2004), (Sonebi et al., 2013)]. Este método permite uma concepção do *grout* respeitando vários factores como, por exemplo, as dosagens de superplastificante (Baltazar et al., 2012c). No entanto, tal como alguns autores, Brás (Brás, 2011) concluiu que o diâmetro do orifício de saída do cone de Marsh é inadequado para a concepção do *grout* para efeitos de injeção no que se refere à distribuição granulométrica de materiais finos (< 4 mm), como é o caso do meio poroso estudado neste trabalho. Um cone de Marsh com 10 mm de diâmetro parece não ser o mais indicado para a medição do tempo de escoamento de *grouts* concebidos para preencher os vazios, uma vez que não é suficientemente sensível. Assim, Le Roy e Roussel (Le Roy & Roussel, 2004) observaram que o erro obtido com um diâmetro com orifício de 10 mm é dez vezes superior do que com um diâmetro com orifício de 6 mm.

De maneira a melhorar o significado físico do ensaio do cone de Marsh, Miltiadou-Fezans (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012) criou o teste de factor de fluidez. Este teste apresenta algumas

alterações em relação à norma ASTM C939-02 (American Society for Testing and Materials, 2002a), nomeadamente o menor diâmetro do orifício do cone de Marsh, de apenas 3 mm. Além disso, o tempo de escoamento é medido por um fluxo com apenas  $Q=100 \text{ cm}^3$  em vez dos convencionais 1000/1200  $\text{cm}^3$  usados em diferentes trabalhos [(Assaad & Daou, 2014), (Biçer-Şimşir et al., 2009), (Brás, 2011), (Le Roy & Roussel, 2004), (Sonebi et al., 2013)]. Assim, o autor afirma que a pressão do fluido que actua sobre o orifício do cone é praticamente constante durante o ensaio. Na verdade, de acordo com os resultados de Nehdi (Nehdi et al., 1997), o gradiente de pressão sobre o orifício do cone (parte cilíndrica) diminui à medida que o nível do fluido na parte cónica diminui. O autor observou que as variações do gradiente de pressão no início do ensaio são pequenas (pequenas variações da altura do fluido na parte cónica) e tornam-se mais elevadas no final do ensaio, quando o fenómeno acelera. Refira-se que, dada a pouca variação da altura do fluido, a influência da rugosidade das paredes do cone é minimizada.

Nesta campanha experimental a fluidez foi avaliada com a utilização de cone de Marsh modificado (figura 3.2), tendo o orifício de saída um diâmetro de 6 mm. Assim, foi medido o factor de fluidez para um fluxo de  $Q=800 \text{ cm}^3$ , volume já usado em trabalhos de autores anteriores (Baltazar et al., 2013b), que não induz a uma elevada variação da altura do fluido no interior do cone durante o ensaio. As condições ambientais do laboratório foram caracterizadas por uma humidade relativa de  $60\pm 5\%$  e uma temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$ .



**Figura 3.2 – Ensaio do cone de Marsh. Esq.: Modelo real adoptado; Dir.: Medidas do cone de Marsh**

O conceito do factor de fluidez  $F_l$  é obtido através da seguinte equação:

$$F_l = \frac{Q}{A \times t_f} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde,  $A$  representa a área da secção transversal do orifício de saída e  $t_f$  o tempo de

escoamento. Com base na equação, é possível afirmar que “*grouts* mais fluidos são caracterizados por valores de  $t_f$  mais elevados, ou seja, maiores velocidades de fluxo” (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2012).

### 3.1.3.2. Ensaio de espalhamento

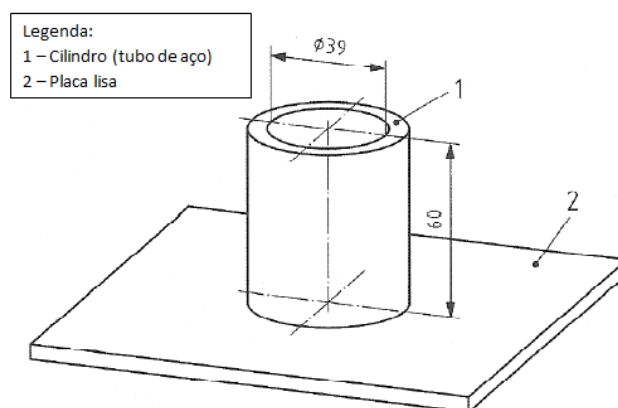
De acordo com a norma NP EN 445:2008 (NP EN 445, 2008), o ensaio de espalhamento (“*mini-slump test*”, em inglês) é utilizado para determinar a fluidez/trabalhabilidade do *grout* no estado fresco. Este ensaio, tal como ilustrado na figura 3.3, baseia-se na medição do diâmetro de espalhamento do *grout* colocado inicialmente no interior de um molde cilíndrico com um diâmetro de 39 mm e uma altura de 60 mm. O molde é colocado no centro da placa de base horizontal e o *grout* é vertido no seu interior, sem excesso. De modo a eliminar eventuais bolhas de ar no interior do molde, este é levemente pressionado e depois cuidadosamente levantado [(Assaad & Daou, 2014), (Sonebi et al., 2013)]. Em seguida, é medido o diâmetro do *grout* depois de espalhado sobre a placa de base horizontal. O diâmetro de espalhamento resulta da média de quatro diâmetros, em vez dos dois referidos na norma, de forma a obter-se uma maior exactidão no seu resultado final, sendo calculado do seguinte modo:

$$e = \frac{d1+d2+d3+d4}{4} \quad (\text{Eq 3.2})$$

Em que:

$e$  – espalhamento médio [cm];

$d1, d2, d3, d4$  – diâmetro em cada direcção ortogonal [cm].



**Figura 3.3 – Esquema representativo do ensaio de espalhamento (adaptado de (NP EN 445, 2008))**

De acordo com alguns autores [(Biçer-Şimşir et al., 2009), (Domone, 1998)], a forma e o

tamanho do espalhamento aquando da paralisação está directamente relacionada com a tensão de cedência, uma vez que durante o ensaio o fluxo de *grout* pára quando as tensões de corte na amostra tornam-se menores que as tensões de cedência plástica. Portanto, o diâmetro de espalhamento pode ser um parâmetro relevante para estimar a tensão de cedência do material. Na figura 3.4 pode observar-se um exemplo do procedimento descrito anteriormente.



**Figura 3.4 – Procedimento do ensaio de espalhamento. Esq.: Colocação do molde cilíndrico; Dir.: Espalhamento do *grout* após levantamento do molde cilíndrico**

### **3.1.3.3. Ensaio de estabilidade**

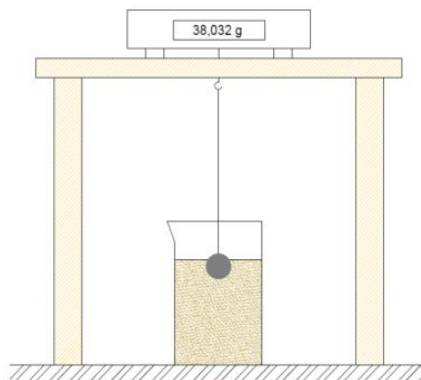
A estabilidade do *grout* foi analisada através da medição de variações de massa volúmica da zona superior de um volume de *grout* em repouso num recipiente, um procedimento desenvolvido por Van Rickstal (Van Rickstal, 2000). As amostras de *grout* foram colocadas num copo de 500 mL contendo um objecto esférico, com um volume de 4,85 cm<sup>3</sup> e uma massa de 34,29 g suspenso a partir do equilíbrio, como se pode verificar pelo esquema da figura 3.5 e pelo exemplo da figura 3.6. De acordo com a Lei de Arquimedes a esfera sob flutuação sofre uma força ascendente. Esta força de impulsão varia com a massa volúmica do *grout*, que se altera quando a instabilidade conduz à deposição de partículas no fundo do copo, causando uma diminuição da densidade nas camadas superiores. Assim, uma pequena variação dos valores de massa volúmica do *grout* traduz-se, consequentemente, numa pequena segregação e exsudação. Com efeito, foi registada a variação de massa ao longo do tempo de realização do ensaio. A análise dos resultados (apresentada no capítulo seguinte) foi efectuada com base na percentagem da massa volúmica inicial para cada valor de massa, registada através do seguinte modo:

$$estabilidade = \frac{\rho}{\rho_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Em que:

$\rho$  – massa volúmica do *grout* com o decorrer do tempo de ensaio [ $\text{Kg/m}^3$ ];

$\rho_i$  – massa volúmica inicial do *grout* [ $\text{Kg/m}^3$ ].



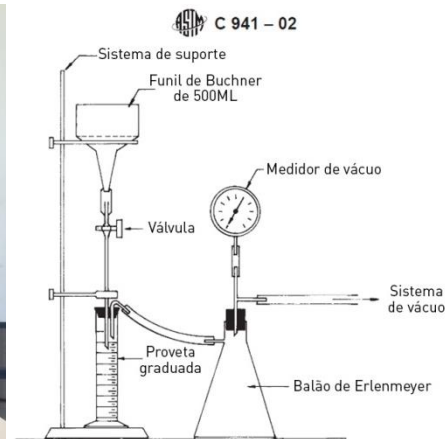
**Figura 3.5 – Esquema representativo do ensaio de estabilidade (Baltazar et al., 2012c)**



**Figura 3.6 – Ensaio de estabilidade. Esq.: Equipamento utilizado no ensaio de estabilidade; Dir.: Esfera imersa na amostra de *grout***

#### **3.1.3.4. Ensaio de retenção de água**

A medição de retenção de água foi realizada de acordo com a norma ASTM C941-02 (American Society for Testing and Materials, 2002b). Este ensaio determina o tempo necessário para retirar uma certa quantidade de água a partir da amostra de *grout*. Foi aplicada uma depressão de  $5,0 \pm 0,2$  kPa, controlada por um manómetro digital, a um funil de Bruckner, contendo 500 mL de *grout*, ao mesmo tempo que um cilindro graduado recolhia a água removida. A norma recomenda que o ensaio termina quando forem removidos 60 mL, mas apenas foram considerados 45 mL, uma vez que alguns autores foram incapazes de perder 60 mL de água. Uma das razões para a dificuldade de remoção de 60 mL da água constituinte do *grout*, é devido ao fenómeno de segregação. Este fenómeno torna-se mais gravoso à medida que o tempo aumenta, uma vez que as partículas da mistura depositam-se no fundo do funil, impedindo assim a remoção de água.



**Figura 3.7 – Ensaio de retenção de água. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adoptado para medição da retenção de água (adaptado de (American Society for Testing and Materials, 2002b))**

### **3.1.4. Ensaios realizados no estado endurecido**

#### **3.1.4.1. Ensaio de determinação das resistências à flexão e à compressão**

À semelhança dos restantes procedimentos experimentais, para a determinação das resistências mecânicas foram produzidos provetes com as diferentes composições de *grout* (*grouts* com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante). Assim, durante a fase de ensaios do *grout* no estado fresco, foram retiradas ocasionalmente amostras e colocadas em moldes metálicos para a execução de provetes prismáticos de modo a ser possível a determinação das respectivas resistências à flexão e à compressão. Os provetes têm as dimensões 40x40x160 mm, medidas com recurso a uma craveira. As dimensões dos provetes, o equipamento utilizado e a técnica de ensaio são idênticas às aplicadas na norma EN 1015-11:1999 (EN 1015-11, 1999). Ao todo foram moldados 9 provetes prismáticos, três para cada tipo de *grout*, quantidade suficiente para a realização dos dois ensaios referidos. Após a moldagem os provetes permaneceram dentro de sacos de polietileno durante os primeiros cinco dias, de modo a minimizar a maior retracção numa fase inicial, onde a perda de água é mais significativa. Após estes cinco dias, os provetes foram retirados dos moldes e controlados a uma temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e uma humidade relativa de  $60 \pm 5\%$  até ao dia dos ensaios. Ambos os ensaios foram realizados aos 28 dias.



**Figura 3.8 – Provete prismáticos (esq.) e moldes metálicos utilizados (dir.)**

Para ambos os ensaios, recorreu-se uma máquina de ensaios mecânicos ZWICK/ROELL Z050 com uma célula de carga de 50 kN. Para o ensaio de resistência à flexão foi aplicada uma pré-carga de 10 N e uma velocidade de aplicação de carga de 0,2 mm/min até atingir a rotura do provete. A aplicação da carga é efectuada a meio-vão do provete prismático, através de um ponto de apoio superior. O provete é colocado sobre a base do suporte, cujos pontos de apoio inferiores distam 100 mm entre si e equidistantes do local de aplicação da força, com as faces de moldagem em contacto com as superfícies que transmitem a carga, para um melhor contacto e perfeita perpendicularidade relativamente aos pontos de apoio. De seguida, coloca-se a prensa em contacto com a face superior do provete e aplica-se a carga gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete. Os valores de deformação e força aplicada são registados num *software* associado ao equipamento, sendo que após a identificação da rotura o ensaio é parado e o valor máximo ( $F_{\text{flexão}}$ ) é registado. Através da figura 3.9 é possível visualizar-se um exemplo de aplicação do ensaio de resistência à flexão a um provete.



**Figura 3.9 – Sistema de ensaio de resistência à flexão**



A resistência à flexão é calculada da seguinte forma:

$$R_{flexão} = \frac{1,5 \times F_{flexão} \times l}{a \times b^2} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Em que:

$R_{flexão}$  – Resistência à flexão [MPa];

$F_{flexão}$  – Carga máxima aplicada de flexão [kN];

$l$  – distância entre apoios na face inferior do provete [mm];

$a, b$  – dimensões laterais do provete [mm].

Após o ensaio de resistência à flexão procedeu-se ao ensaio de resistência à compressão. Os provetes utilizados para este ensaio são os mesmos do ensaio de resistência à flexão, pois resultam da divisão em duas metades (meios prismas) aquando da rotura a meio-vão. As dimensões destes meios prismas, tal como no ensaio de resistência à flexão, são medidos com recurso a uma craveira. Para o ensaio de resistência à compressão foi aplicada uma pré-carga de 100 N e uma velocidade de aplicação de carga de 0,7 mm/min. O provete é colocado centrado num dispositivo de compressão metálico que assegura uma área de contacto, de secção quadrada (40x40 mm), com as faces de moldagem em contacto com as superfícies que transmitem a carga, e perfeitamente perpendiculares ao eixo da base de apoio. Deste modo, consegue-se garantir uma maior uniformidade na aplicação da carga e aderência entre o provete o dispositivo de compressão. Seguidamente, aplica-se a carga gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete. À semelhança do ensaio de resistência à flexão, são registados os valores de deformação e do valor máximo da força aplicada ( $F_{comp}$ ).

Na figura 3.10 pode observar-se um exemplo de um provete sujeito ao ensaio de resistência à compressão.



**Figura 3.10 – Sistema de ensaio de resistência à compressão**



A resistência à compressão é obtida através da seguinte fórmula:

$$R_{comp} = \frac{F_{comp}}{A} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Em que:

$R_{comp}$  – Resistência à compressão [MPa];

$F_{comp}$  – Carga máxima de rotura à compressão [kN];

$A$  – Área de aplicação da carga [mm].

## 3.2. Estudo do meio poroso

### 3.2.1. Materiais estudados

Os meios porosos que se encontram descritos abaixo foram alvo de aplicação em momentos distintos da campanha experimental, e como tal apresentam diferentes designações. O material arenoso (areia) insere-se no estudo preliminar da campanha experimental no qual se analisa a variação do superplastificante (capítulo 4), enquanto que os materiais calcário e cerâmico foram utilizados posteriormente (capítulo 5). A escolha pelo material poroso constituído por areia na primeira fase da campanha experimental é devida a este se inserir num estudo mais amplo, entre outros trabalhos, em que a areia foi também o material escolhido.

#### 3.2.1.1. *Material arenoso*

Foram utilizadas areias da marca AREIPOR, lavadas e posteriormente secas em estufa, com quatro tamanhos de partículas de areia diferentes, como ilustra a figura 3.11. A escolha destes tamanhos foi semelhante à de estudos anteriores (Guerreiro, 2014).

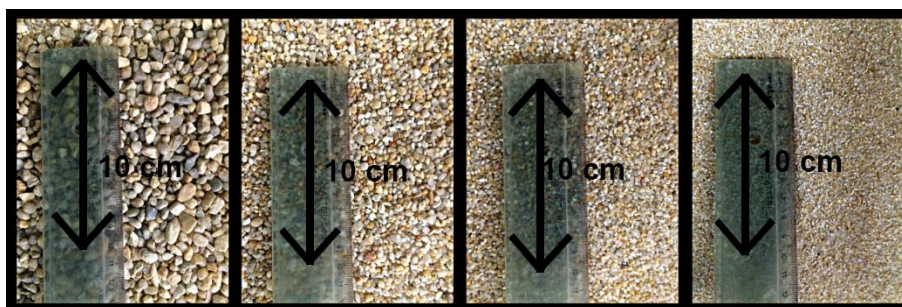
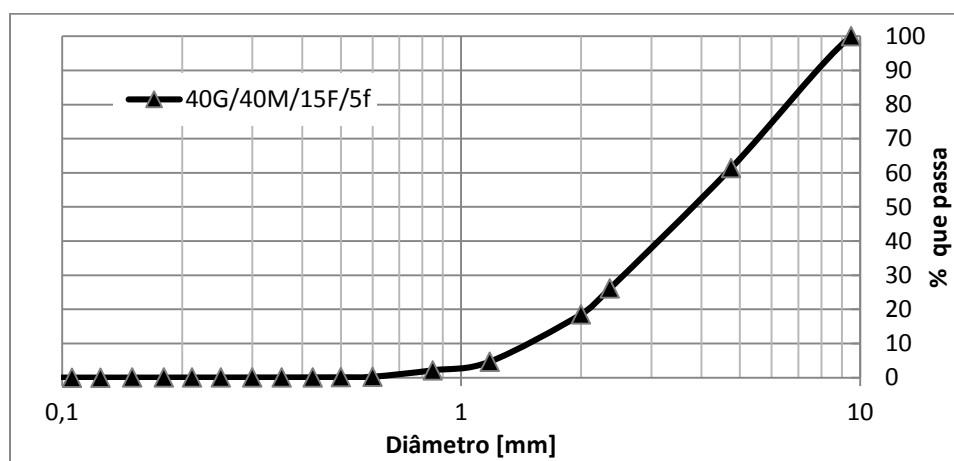


Figura 3.11 – Areia: Quatro dimensões diferentes (grosso, médio, fino e mais fino)

Com o intuito de estudar as variáveis anteriormente descritas (vd. quadro 3.5) foi criado o meio poroso com a designação 40G/40M/15F/5f, no qual se injectaram os diferentes *grouts*. Em seguida, apresenta-se a composição do meio poroso constituído por areia tendo em conta as diferentes dimensões das partículas, no quadro 3.6, e a correspondente curva granulométrica, na figura 3.12.

**Quadro 3.6 – Composição do meio poroso constituído por areia**

Designação	Grosso (9,5mm - 4,75mm)	Médio (4,75mm - 2,0mm)	Fino (2,36mm - 1,18mm)	Mais fino (2,0mm - 0,5mm)
40G/40M/15F/5f	40%	40%	15%	5%



**Figura 3.12 – Areia: Curva granulométrica do meio poroso (adaptado de (Guerreiro, 2014))**

Apresentam-se ainda, no quadro 3.7, as características do meio poroso 40G/40M/15F/5f, nomeadamente a porosidade (expressa em percentagem), a baridade (em g/cm<sup>3</sup>) e d<sub>10</sub>, que se refere ao diâmetro da partícula correspondente a 10% de material passado (em mm).

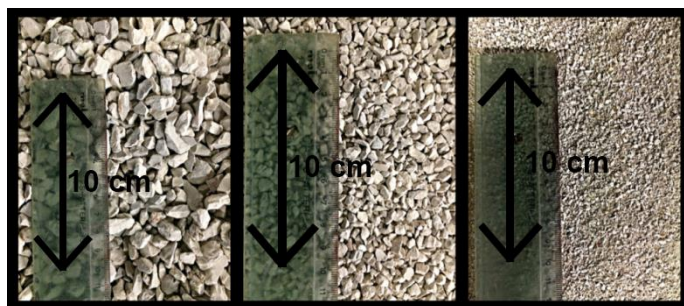
**Quadro 3.7 – Características do meio poroso de areia**

	Designação
	40G/40M/15F/5f
Porosidade [%]	41,8
Baridade [g/cm <sup>3</sup> ]	1,51
d <sub>10</sub> [mm]	1,49

### 3.2.1.2. *Material calcário*

O material calcário, proveniente da britagem de pedra calcária, foi outro dos materiais utilizados no presente estudo. Para este tipo de material apenas se utilizaram três diferentes dimensões de partículas, e não quatro como no caso da areia. Na figura 3.13, podem observar-se as diferentes

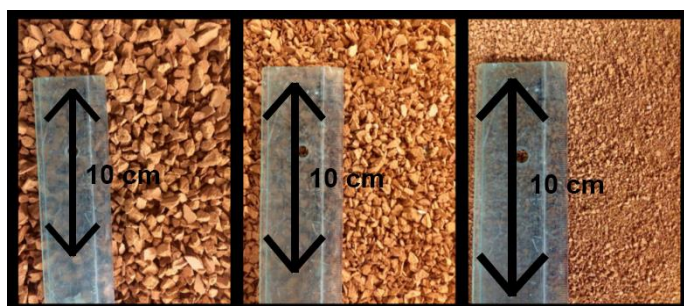
dimensões utilizadas, diferenciadas por grosso, médio e fino.



**Figura 3.13 – Material calcário: Três dimensões diferentes (grossa, média, fina)**

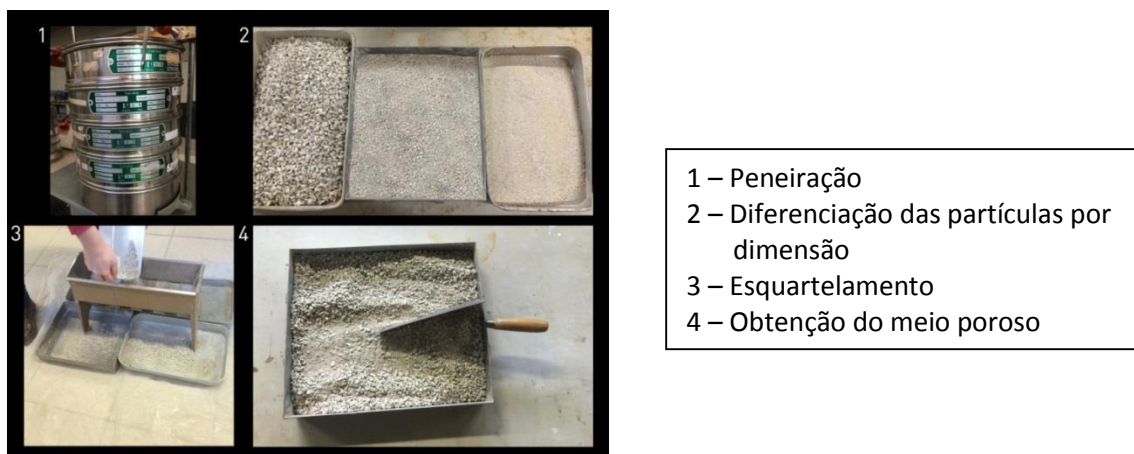
### **3.2.1.3. Material cerâmico**

Foi também utilizado material cerâmico, obtido através do esmagamento de tijolos cerâmicos furados, em partículas. Tal como no material calcário, foram utilizados três diferentes granulometrias, que podem ser observadas através da figura 3.14.



**Figura 3.14 – Material cerâmico: Três dimensões diferentes (grossa, média, fina)**

De forma a simular as condições existentes no interior de uma alvenaria com diferentes permeabilidades e volumes de vazios foram criados modelos representativos, constituídos por cinco combinações dos três tamanhos referidos (grosso, médio e fino) de partículas de material calcário e material cerâmico, respectivamente. Após lavagem e secagem, ambos os materiais foram peneirados e esquartelados, tendo sido obtidos cinco meios porosos com diferentes granulometrias, com designações de A a E. Através da figura 3.15 pode observar-se um exemplo do procedimento para a obtenção dos diferentes tipos de meios porosos.

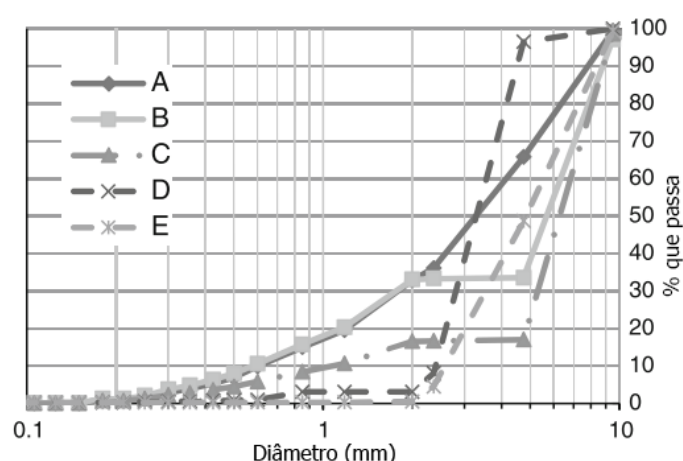


**Figura 3.15 – Procedimento realizado para obtenção dos diferentes tipos de meios porosos**

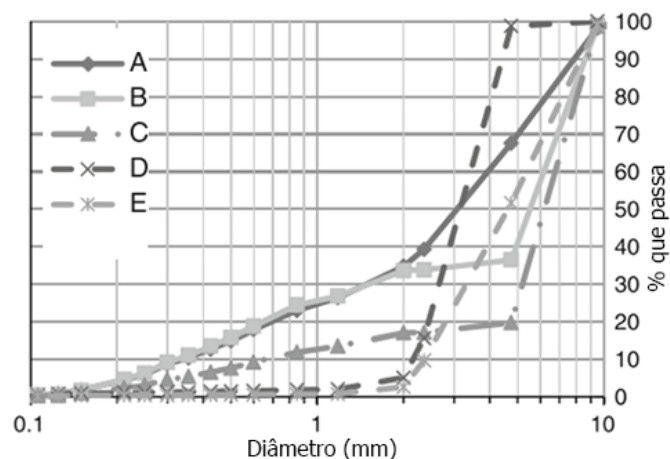
No quadro 3.8, os diferentes tipos de meios porosos encontram-se diferenciados de acordo com cada designação e correspondentes tamanhos de partículas dos materiais. Posteriormente, apresentam-se as correspondentes distribuições granulométricas na figura 3.16 e figura 3.17 (material calcário e cerâmico, respectivamente). Tal como no caso da areia, a escolha destas granulometrias foi semelhante à de estudos anteriores (Jorne et al., 2015b).

**Quadro 3.8 – Meios porosos injectados (material calcário e cerâmico)**

Designação	Grosso (9,5mm - 4,75mm)	Médio (4,75mm - 2,0mm)	Fino (2,0mm - 0,15mm)
A	1/3	1/3	1/3
B	2/3	-	1/3
C	5/6	-	1/6
D	-	1	-
E	1/2	1/2	-



**Figura 3.16 – Material calcário: Curvas granulométricas dos diferentes tipos de meio poroso (Jorne et al., 2015b)**



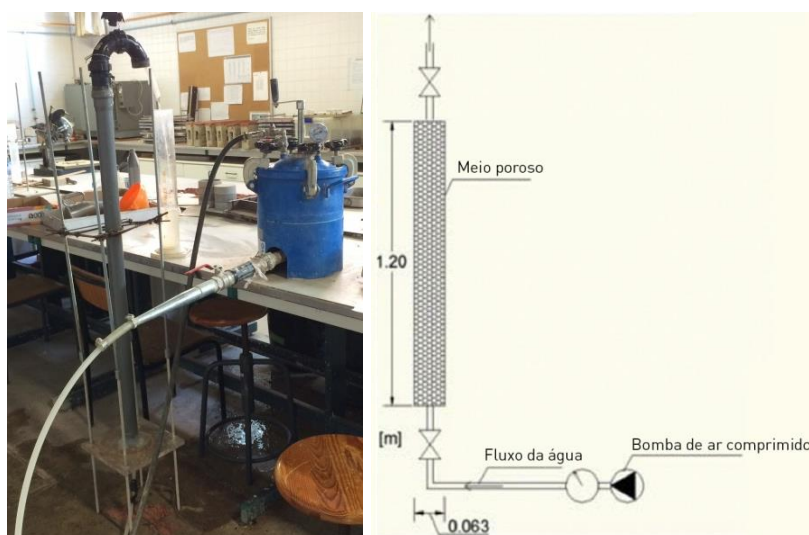
**Figura 3.17 – Material cerâmico: Curvas granulométricas dos diferentes tipos de meio poroso (Jorne et al., 2015b)**

Ambos os conjuntos de meios porosos (de material calcário e cerâmico) podem ser analisados em simultâneo, visto serem aplicados na mesma fase da campanha experimental. No quadro 3.9 é possível verificar que, através dos resultados obtidos por Jorne (Jorne et al., 2015b), as características das partículas cerâmicas apresentam algumas diferenças comparativamente às partículas de calcário. Particularmente, as partículas de material cerâmico apresentam uma porosidade ligeiramente superior para qualquer tipo de granulometria. A porosidade de cada material foi obtida através do volume de água preenchido dentro de cilindro. Os valores da porosidade dos dois materiais situam-se entre 40% e 55%, que correspondem a uma gama de percentagens típica do estudo de paredes de alvenaria, se apenas se considerar a dimensão do núcleo interno. É de referir que este parâmetro não traduz o valor real da porosidade que o *grout* consegue penetrar dentro do meio poroso, sendo este último naturalmente bastante inferior. Em relação à baridade de cada material, o material calcário apresenta valores superiores comparativamente ao cerâmico. Outros parâmetros que ajudam a melhor caracterizar o meio poroso são o d10, d50 e d90 que correspondem, respectivamente, ao diâmetro da partícula através do qual 10%, 50% e 90% de material que passa. Relativamente à capacidade de absorção de água, o material cerâmico apresenta valores superiores quando comparando com o material calcário. Trata-se de um parâmetro de extrema importância como se verá mais adiante neste trabalho.

**Quadro 3.9 – Características dos meios porosos (material calcário e cerâmico) (adaptado de (Jorne et al., 2015b))**

	Designação									
	Material calcário					Material cerâmico				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
<b>Porosidade [%]</b>	41,2	39,3	44,6	50,4	48,4	48,1	48,7	51,5	56,6	55,4
<b>Baridade [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,51	1,53	1,45	1,34	1,38	1,21	1,22	1,15	1,01	1,06
<b>d<sub>10</sub> [mm]</b>	0,60	0,58	1,08	2,41	2,66	0,34	0,32	0,67	2,17	2,38
<b>d<sub>50</sub> [mm]</b>	2,67	5,23	6,09	3,22	4,28	2,42	5,02	5,97	3,06	4,09
<b>d<sub>90</sub> [mm]</b>	8,17	8,97	9,00	4,58	8,62	8,22	8,82	8,97	4,50	8,59
<b>Superfície específica [mm<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup>]</b>	5,03	4,90	3,17	2,86	2,02	6,06	5,84	3,38	2,63	1,72
<b>Absorção de água [%]</b>	5,6	3,9	2,2	2,2	1,5	19,4	19,1	16,2	14,3	12,5

Outro parâmetro importante na caracterização dos meios porosos é a permeabilidade. A permeabilidade do meio poroso representa um dos principais parâmetros que influenciam a penetração, evolução e distribuição do *grout* dentro da alvenaria. Com efeito, foi realizada a medição da permeabilidade dos diferentes meios porosos com o intuito de determinar a sua influência no processo de injeção e na difusão do *grout* no interior da alvenaria. A medição da permeabilidade foi efectuada de acordo com o dispositivo representado na figura 3.18, onde é registado o tempo necessário para que um certo volume de água atravessasse o meio poroso a uma dada pressão aplicada.



**Figura 3.18 – Ensaio de permeabilidade. Esq.: Modelo real utilizado; Dir.: Dispositivo adoptado para medição da permeabilidade do meio poroso (adaptado de (Jorne et al., 2015a))**

Com base na Lei de Darcy (Eq. 3.6), a permeabilidade do meio poroso para fluxos laminares é fornecida de seguinte forma:

$$q = \frac{K \times A}{\mu \times L} \times \Delta P \quad (\text{Eq. 3.6})$$



Onde,  $q$  representa o fluxo de água ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $K$  a permeabilidade ( $\text{m}^2$ ),  $A$  a área do tubo ( $\text{m}^2$ ),  $\mu$  a viscosidade dinâmica da água ( $\text{Pa.s}$ ),  $L$  o comprimento do tubo ( $\text{m}$ ) e  $\Delta P$  a diferença de pressão aplicada.

A relação entre a pressão e o fluxo de água que atravessa o meio poroso constituído pelas diferentes distribuições granulométricas pode ser observada nas figuras 3.19 e 3.20.

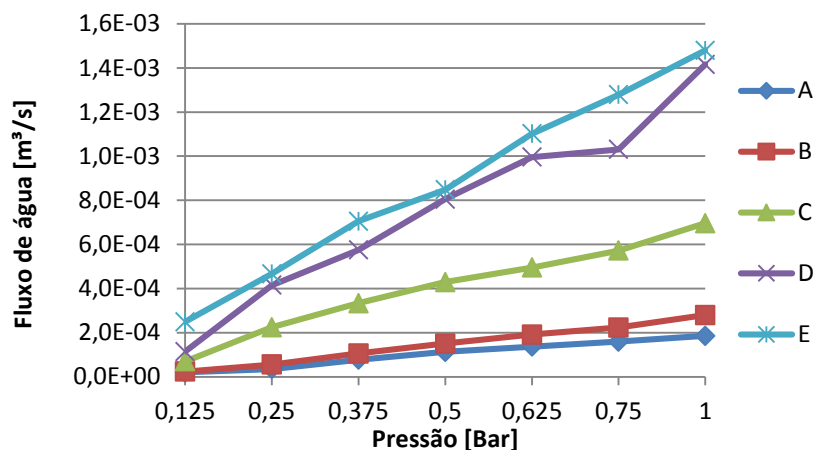


Figura 3.19 – Material cerâmico: Fluxo de água [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] vs Pressão [Bar]

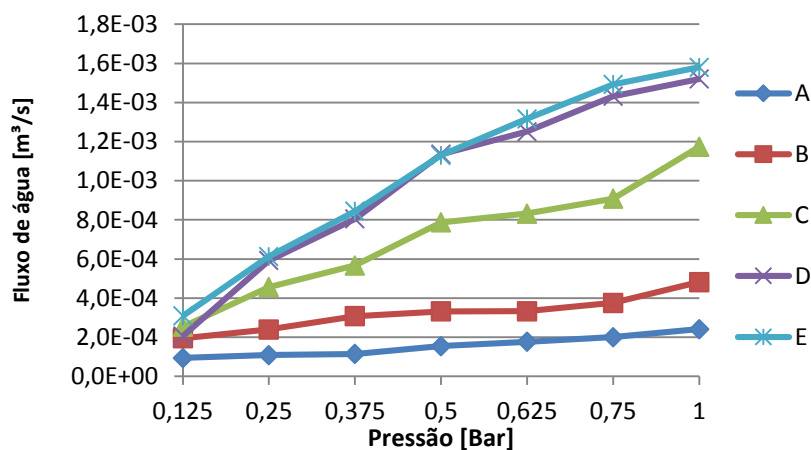


Figura 3.20 – Material calcário: Fluxo de água [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] vs Pressão [Bar]

No que se refere ao meio poroso fino (tipos A e B), este apresenta valores de fluxo de água relativamente baixos independentemente da pressão aplicada. Relativamente ao meio poroso grosseiro (tipos C, D e E), verifica-se um aumento do fluxo de água à medida que é aplicada maior pressão, numa relação quase-linear. Sobre os meios porosos finos a baixa pressão a água leva mais tempo a penetrar no seu interior, resultando num fluxo de água inferior. Assim, é necessário aumentar a pressão para a água penetrar nos poros de menor dimensão. No que diz respeito a meios porosos grosseiros, uma vez que possuem poros de diâmetro superior, a baixa pressão, a água consegue facilmente penetrar na maioria dos poros, resultando num aumento rápido de fluxo de água mesmo a baixas pressões.

Comparando os valores obtidos entre cada material, verifica-se que a permeabilidade do tijolo cerâmico moído é inferior à da pedra calcária para qualquer amostra ensaiada. Este facto é essencialmente devido a maiores níveis de absorção de água por parte das partículas cerâmicas. Aliás, para além de apresentar maior superfície específica (o que significa maior área de contacto com a água) trata-se de um material poroso, e como tal apresenta maior porosidade, o que contribui para uma taxa de fluxo inferior (maior resistência à passagem da água), que se traduz em valores de permeabilidade mais reduzidos.

### **3.2.2. Ensaios realizados no estado fresco**

#### **3.2.2.1. Ensaio de injeção**

Conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho vem no seguimento de injeções de *grout* realizadas para a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne, nas quais foram utilizados modelos representativos que simulam meios porosos constituintes do núcleo interno de alvenarias antigas. Nestes modelos utilizaram-se cilindros acrílicos com 152 mm de diâmetro e 300 mm de altura, nos quais os meios porosos em estudo foram colocados para posterior injeção. De referir ainda que se recorreu a uma metodologia desenvolvida por Jorne (Jorne et al., 2015b), que consiste na introdução de uma camada descontínua de material calcário grosseiro com 2 cm de altura na base do cilindro junto ao local de entrada da injeção. Esta solução adoptada tem a função de impedir o adensamento de partículas do meio poroso nessa zona de modo a evitar problemas de perturbação ou bloqueio à passagem do *grout* por parte do meio poroso. Contudo, é importante referir que a injeção de *grout* realizada com recurso a este modelo pode proporcionar melhores condições de injeção comparativamente a uma situação de uma alvenaria real, uma vez que no modelo existe um maior número de vazios ligados entre si do que é expectável numa alvenaria real, especialmente no interior dos panos de alvenaria (Binda et al., 2003a).

As injeções de *grout* foram realizadas segundo o procedimento que se encontra ilustrado na figura 3.21 (esquema) e figura 3.22 (imagem real), utilizando um sistema dispositivo baseado em trabalhos anteriores [(Binda et al., 2003a), (Brás & Henriques, 2012), (Van Rickstal, 2000)].



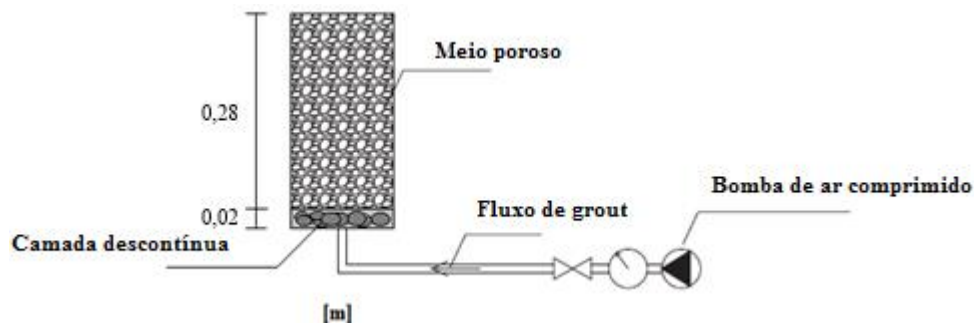


Figura 3.21 – Esquema representativo do método de injeção (adaptado de (Coelho, 2013))



Figura 3.22 – Modelo real do método de injeção

A injeção foi efectuada tridireccionalmente da base para o topo, com uma pressão de 1bar (0,1Mpa) constante durante o processo. Uma vez que não existe uma definição quantitativa para o valor da capacidade de injeção de *grout*, foi adoptada uma equação que, segundo Jorne (Jorne et al., 2015b), permite verificar se a injeção é bem ou mal sucedida. Assim, para uma certa pressão aplicada, o valor de injectabilidade (-) obtém-se através do quociente entre o volume de *grout* injectado ( $m/\rho$ ) e o volume de vazios do meio poroso ( $V_v$ ), variando entre 0 e 1 consoante o desempenho da injeção de *grout*, e calcula-se deste modo:

$$I = \frac{\frac{m}{\rho}}{V_v} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde,  $I$  corresponde à injectabilidade do *grout* (-),  $m$  à massa de *grout* injectado (kg),  $\rho$  à massa volúmica do *grout* (kg/m<sup>3</sup>) e  $V_v$  ao volume de vazios do meio poroso (m<sup>3</sup>). Note-se que previamente à injeção do *grout* é efectuada a medição do peso do cilindro, de modo a ser possível obter o valor da quantidade de *grout* injectado após o ensaio de injeção.

### **3.2.3. Ensaio realizados no estado endurecido**

#### **3.2.3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons**

Entenda-se ultra-som como uma onda mecânica longitudinal com frequência acima de 20KHz, cuja sua audição não é possível para o ser humano. Ondas acústicas que emitam uma frequência de valor superior a 20.000Hz não são detectáveis pelo ouvido humano, sendo então designada por frequência ultra-sónica (Coelho, 2013).

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons representa uma técnica não-intrusiva que tem como objectivo a detecção de descontinuidades internas, presentes nos mais diversos tipos de materiais. Trata-se de um método não-destrutivo que permite avaliar com o menor grau de incerteza possível o estado do interior de um material ou elemento construtivo [(Binda et al., 2007), (Binda & Saisi, 2009), (Jorne et al., 2012b)]. Esta técnica ultra-sónica assenta no princípio de propagação de ondas elásticas, o qual define a velocidade de propagação das ondas depende das propriedades elásticas do meio. Deste modo, a velocidade é tanto maior quanto maior for a massa volúmica do material, uma vez que a onda se propaga por vibração das partículas sólidas que o constituem. Assim, as variações significativas da velocidade de transmissão denunciam alterações relevantes nas características dos materiais onde a onda se propaga [(Anzani et al., 2006), (Binda et al., 2007), (Concu et al., 2010a)].

Para garantir uma medição real do material da amostra, esta não deve apresentar humidade no seu interior, pois a sua existência pode causar um aumento da velocidade de propagação de ultra-sons. Com efeito, após a secagem das amostras numa estufa a uma temperatura de  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$  e o posterior arrefecimento até à temperatura ambiente (FCT - UNL, 1996), procedeu-se à realização do ensaio de acordo com a norma ASTM C597-02 (American Society for Testing and Materials, 2002c), segundo o método por transmissão directa (*trough-transmission*), como ilustrado na figura 3.23. Este método consiste na colocação de um transdutor emissor de um dos lados do corpo a ensaiar e de um transdutor receptor na face oposta. De modo a garantir a eficácia do ensaio foi colocado um gel próprio para ultra-sons que actua como agente de ligação entre os transdutores e as amostras, evitando assim a existência de bolsas de ar. Foi utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) LAB da PROCEQ, que emite um impulso eléctrico de baixa frequência ultra-sónica. Optou-se pela utilização de um transdutor cónico de 54KHz e o valor de sinal emitido de 500V e o ganho máximo permitido pelo equipamento (100x), que de acordo com Coelho (Coelho, 2013), são as condições que melhores resultados garantem.



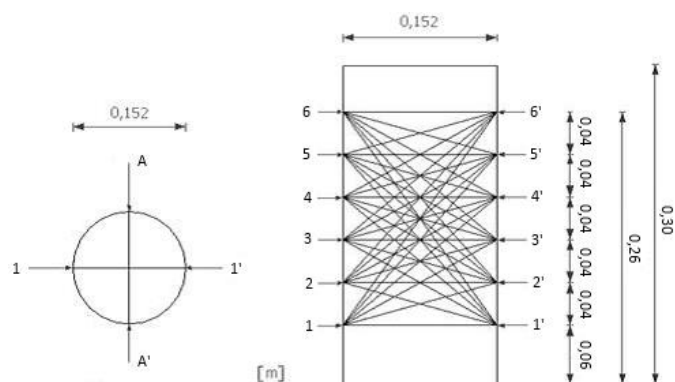
**Figura 3.23 – Medição efectuada num provete inteiro (esq.) e numa fatia (dir.) através do método por transmissão directa**

Após assegurar-se um adequado acoplamento entre o material a ensaiar e os transdutores, procedeu-se à medição dos tempos ( $T$  em segundos) que o impulso emitido levou a percorrer as distâncias ( $L$  em metros) desde o transmissor até ao receptor.

A velocidade de ultra-sons foi então obtida do seguinte modo:

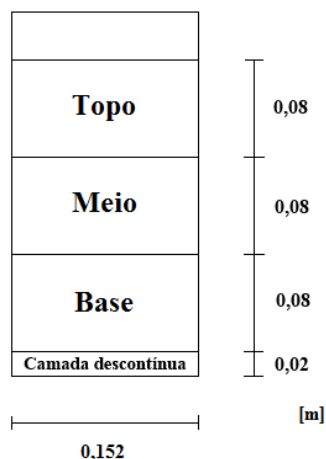
$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Para a avaliação de cada um dos provetes injectados teve-se como procedimento a realização de dois tipos de ensaios distintos. O ensaio de ultra-sons do provete inteiro e das fatias, ambos abordados em seguida. O ensaio de ultra-sons no provete inteiro tem como objectivo a análise da amostra como um todo e, como tal, foi utilizada uma malha como a ilustrada na figura 3.24. Trata-se de uma metodologia desenvolvida por Jorne (Jorne et al., 2012b), em que a malha apresenta na sua constituição seis pontos distando 4 cm entre si, com o ponto inferior a 6 cm da base (devido à presença da camada descontínua de 2 cm), ao longo de quatro linhas longitudinais às amostras perpendiculares com os topos.



**Figura 3.24 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de provete inteiro: vista de topo (esq.) e corte 1-1' (dir.) (Guerreiro, 2014)**

Após a análise da velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas na totalidade do provete e da recolha dos dados necessários à elaboração da análise tomográfica (realizada à *posteriori*, como se verá mais adiante), os provetes foram sujeitos a cortes transversais a 2 cm, 10 cm, 18 cm e 26 cm da face inferior da base, de acordo com o esquema representado na figura 3.25. Destes cortes resultaram três fatias distintas de cada amostra: base (fatia localizada entre os 2 e os 10 cm de altura do provete), meio (fatia localizada entre os 10 e os 18 cm de altura do provete) e topo (fatia localizada entre os 18 e os 26 cm de altura do provete). A camada descontínua e a zona superior foram desprezadas.



**Figura 3.25 – Esquema representativo da localização dos cortes efectuados nos provetes (Guerreiro, 2014)**

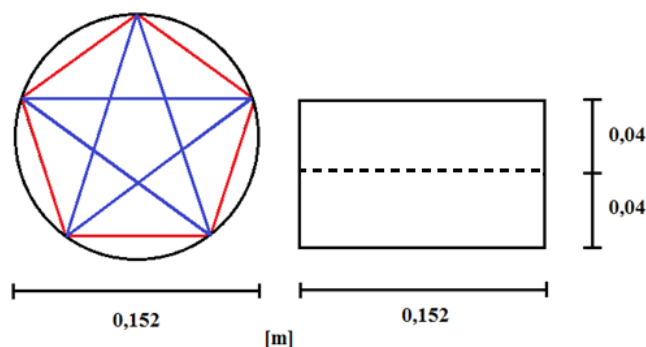
O corte foi realizado húmido com recurso a uma máquina de corte JUMBO e a sua execução encontra-se ilustrada na figura 3.26. O procedimento a realizar foi apenas de marcação, fixação e corte dos provetes nas zonas pretendidas.



**Figura 3.26 – Corte do provete**

Posteriormente ao corte de cada provete em três fatias, realizou-se o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons em cada uma. A sua realização foi efectuada segundo o mesmo método (método por transmissão directa) e nas mesmas condições que os provetes. Contudo, como objecto de estudo foram desta vez utilizadas as fatias resultantes do corte dos provetes e não a sua totalidade. O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons das fatias tem como objectivo analisar as diferenças

em altura do meio poroso injectado, de modo a compreender a eficácia da injeção em função da altura. Neste caso, foi obviamente utilizada uma malha específica para medição das velocidades de propagação de ultra-sons. A malha em questão, já utilizada por diversos autores [(Jorne et al., 2012b), (Jorne et al., 2014), (Coelho, 2013), (Guerreiro, 2014)], foi disposta em forma de pentágono, localizada a meia altura da cada fatia e encontra-se esquematizada na figura 3.27. De referir que, na mesma figura, as distâncias a azul têm um comprimento de 14,5 cm, enquanto as distâncias a vermelho têm um comprimento de 8,9 cm.



**Figura 3.27 – Esquema da malha de ensaio de ultra-sons de em cada fatia inteira: vista de topo (esq.) e vista lateral (dir.) (Guerreiro, 2014)**

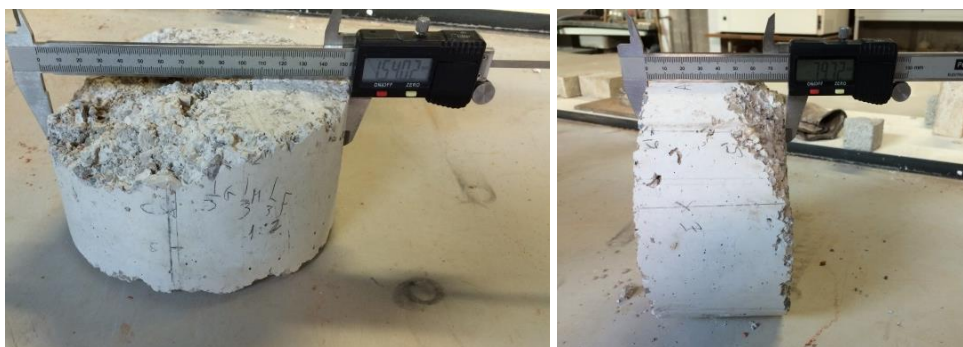
### **3.2.3.2. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral**

Após a realização do ensaio de velocidade de ultra-sons seguiu-se a realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) em cada uma das fatias. O ensaio foi realizado com uma máquina de ensaio ZWICK/ROELL Z050 (figura 3.28) com uma célula de carga de 50 kN. Os parâmetros de funcionamento do sistema de ensaio foram definidos com uma pré-carga de 100 N e uma deformação imposta de 0,7 mm/min.



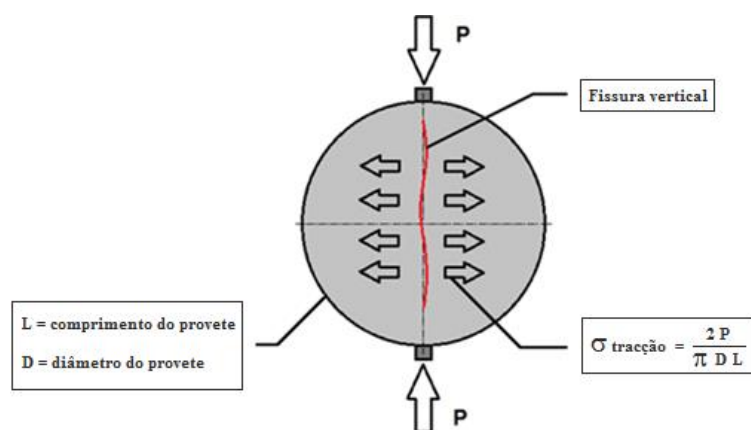
**Figura 3.28 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral**

Este ensaio requer, no entanto, o conhecimento das dimensões das amostras, pelo que foram realizadas medições em todas as fatias de modo a obter o diâmetro e espessura médios. As medições foram efectuadas com recurso a uma craveira, tal como ilustrado na figura 3.29, e os valores utilizados para o cálculo final da resistência à tracção por compressão diametral resultaram da média de quatro medições, quer do diâmetro (em quatro direcções distintas), quer da espessura das fatias (em quatro pontos distintos).



**Figura 3.29 – Medição das dimensões da fatia: diâmetro (esq.) e espessura (dir.)**

Conhecidas as dimensões das fatias, procedeu-se à realização do ensaio de acordo com a norma C 496/C 496M-04 (American Society for Testing and Materials, 2004). Tal como ilustrado na figura 3.30, o ensaio consiste na compressão do provete (fatia) através da aplicação da força em duas geratrizes diametralmente opostas que, conseqüentemente, provoca o aparecimento de tracções na direcção perpendicular à força aplicada, originando a rotura do provete.



**Figura 3.30 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (Coelho, 2013)**

Após a realização do ensaio, obtêm-se o valor da força de rotura  $P$  e calcula-se a resistência à tracção por compressão diametral  $\sigma$  segundo a fórmula:



$$\sigma = \frac{2 P}{\pi D L} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Em que:

$\sigma$  – Resistência à tracção [MPa];

P – Força de rotura [N];

D – Diâmetro do provete [mm];

L – Comprimento do provete [mm].

Através da figura 3.31 é possível observar-se um exemplo real de um provete quando submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, ilustrando o mecanismo de rotura descrito anteriormente.



**Figura 3.31 – Aspecto de uma fatia de uma amostra de calcário após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral**

### **3.2.3.3. Tomografia ultra-sónica**

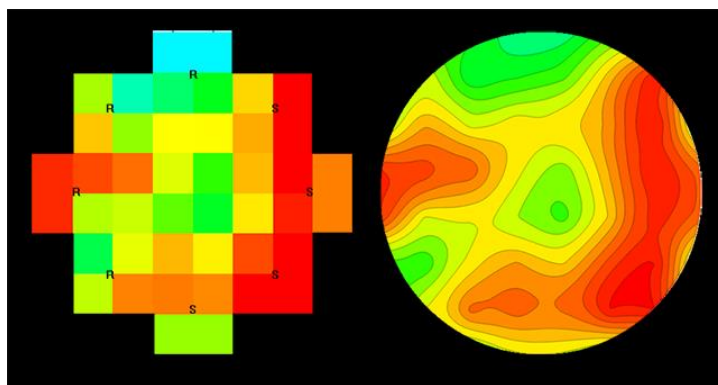
A tomografia ultra-sónica é uma técnica amplamente considerada na elaboração de resultados provenientes de ensaios não-destrutivos, adequada para avaliar as características morfológicas internas de elementos estruturais através do uso de programas computacionais apropriados (Cantini et al., 2012). Esta técnica computacional baseia-se num método iterativo que efectua o processamento das velocidades ultra-sónicas registadas num dado corpo e, através do qual, fornece informações sobre o seu estado interior [(Binda et al., 2003b), (Jorne et al., 2014)].

As velocidades ultra-sónicas são utilizadas para entrada num programa de computador que desenvolve um modelo tridimensional de distribuição dessas velocidades (Schullerl et al., 1997). O resultado são “mapas” designados por tomogramas que podem ser apresentados em duas ou três dimensões, como se verá adiante. Através destes, torna-se possível perceber a localização das zonas mais compactas (associadas às maiores velocidades ultra-sónicas) e menos compactas (associadas às

menores velocidades ultra-sónicas) do corpo em estudo [(Binda et al., 2003b), (Coelho, 2013)].

É relevante referir que as medições das velocidades ultra-sónicas utilizadas na obtenção dos tomogramas foram efectuadas a montante do estudo ultra-sónico das fatias, uma vez que este último implicava o corte dos provetes e impossibilitava a realização das medições dos tempos de propagação das ondas ultra-sónicas entre pontos localizados em diferentes fatias de cada provete. Assim, como referido em 3.2.3.1, foram os resultados obtidos anteriormente do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons do provete inteiro os utilizados para elaboração dos tomogramas. Para a sua elaboração é necessário um conjunto vasto de medições realizadas ao nível da superfície do provete seguindo a mesma malha que se utilizou no ensaio ultra-sónico do provete inteiro (vd. figura 3.24), que se deve adequar ao material a analisar, quer em termos de dimensão, quer no estado de compacidade (Guerreiro, 2014).

O processamento das velocidades ultra-sónicas registadas nos provetes com vista à obtenção de tomogramas foi efectuado com recurso ao programa GEOTOMCG, já utilizado por Guerreiro (Guerreiro, 2014). Este pressupõe o funcionamento com os sistemas operativos actuais e fornecimento de tomogramas em 2D e 3D. Contudo, apesar do *software* apresentar tomogramas 3D de qualidade, no que diz respeito aos planos 2D não fornece imagens com a mesma clareza tomando uma forma demasiado geométrica, e por isso não espelha da melhor forma o interior do provete. Deste modo, recorreu-se a um programa gráfico, denominado por SURFER, com o objectivo de melhorar a qualidade dos tomogramas de duas dimensões. Este programa permite obter imagens com mais qualidade sobre o estado interior do provete (Guerreiro, 2014). Na figura 3.32 encontram-se diferenciados os dois tipos de imagens provenientes dos respectivos programas, referentes à mesma amostra.



**Figura 3.32 – Exemplo de tomograma ultra-sónico de um provete obtido com o GEOTOM (esq.) e tomograma do mesmo provete melhorado com o SURFER (dir.)**

Como já mencionado anteriormente, o processo de obtenção dos tomogramas ultra-sónicos foi efectuado através de um método iterativo denominado por SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*) em que se definiram 15 iterações no total. Trata-se de um método no qual é



realizada uma inversão de dados que produz um campo de velocidades na secção transversal da amostra. Os cálculos com SIRT baseiam-se numa grelha rectilínea tridimensional de pontos, com elementos de volume de intervenção ou *voxels*. Os valores de velocidade são especificados nos pontos, e calculados dentro de *voxels* por interpolação linear múltipla (Guerreiro, 2014). Além disso, num material elástico imperfeito, a atenuação intrínseca provoca uma queda exponencial da amplitude da onda com a distância a partir do ponto de origem, uma vez que as ondas perdem energia devido ao atrito interno, que é tanto maior consoante a magnitude da perdas das propriedades físicas do meio (Buyukozturk, 1998). Assim, é interessante reparar que apesar de implicar longas medições e tempos computacionais, a apertada grelha de medições utilizada permitiu a obtenção de uma resolução mais nítida do provete, através de uma definição mais precisa da forma dos vazios. Esta observação é condizente com os resultados obtidos por Concu et al. [(Concu et al., 2010a), (Concu et al., 2010b)] e Cantini et al. (Cantini et al., 2012). Este último percebeu a influência da densidade do mapa de *ray path* (que depende directamente da grelha escolhida), com destaque para o benefício de alguma redundância para uma melhor resolução dos tomogramas, permitindo uma melhor detecção das heterogeneidades locais.

## 4. VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO *GROUT*

### 4.1. Introdução

Como referido na campanha experimental, esta fase tem como objectivo estudar a variabilidade da composição do *grout* baseando-se na escolha da dosagem de superplastificante mais adequada para ser utilizada posteriormente em diferentes meios porosos com diferentes capacidades de absorção (capítulo 5). Pretende-se nesta fase efectuar uma verificação dos requisitos que os materiais devem cumprir para um bom comportamento antes e depois da intervenção de consolidação.

Assim, esta primeira fase da campanha experimental realizada em laboratório engloba duas avaliações distintas. A primeira avaliação incide no estudo das propriedades intrínsecas do *grout* como produto individual e a sua análise nos estados fresco e endurecido, previamente à sua injeção. No estudo da composição do *grout* foram adicionadas diferentes quantidades de superplastificante, nomeadamente 0,4%, 0,8% e 1,2%. A análise das propriedades do *grout* no estado fresco foi efectuada através da obtenção de resultados de quatro tipos de ensaios, sendo eles: o ensaio do cone de Marsh, o ensaio de espalhamento (ambos avaliam a fluidez do *grout*), o ensaio de estabilidade e o ensaio de retenção de água. Para a análise das propriedades do *grout* no estado endurecido recorreu-se a ensaios de flexão e de compressão dos provetes de *grout*.

A segunda avaliação reside no estudo da consolidação do *grout* juntamente com o meio poroso, onde é feita uma verificação da qualidade da injeção do ponto de vista da injectabilidade através de ensaios de injeção. Posteriormente, já no estado endurecido, é efectuada uma análise das amostras injectadas, quer termos de resistência mecânica (através do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral), quer em termos de compacidade (através dos ensaios de ultra-sons e com recurso à técnica de tomografia ultra-sónica).

Para uma melhor compreensão desta primeira fase da campanha experimental é apresentado na figura 4.1, um fluxograma no qual se encontra esquematizado o processo de selecção do tipo de *grout* a ser utilizado na segunda fase, incluindo os diferentes ensaios realizados. No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados durante a campanha experimental, anteriormente descritos no capítulo 3. Paralelamente são explanados os resultados em coordenação com a bibliografia já existente e relatada no capítulo 2, com o objectivo de dar resposta às questões que conduziram à realização do presente estudo.

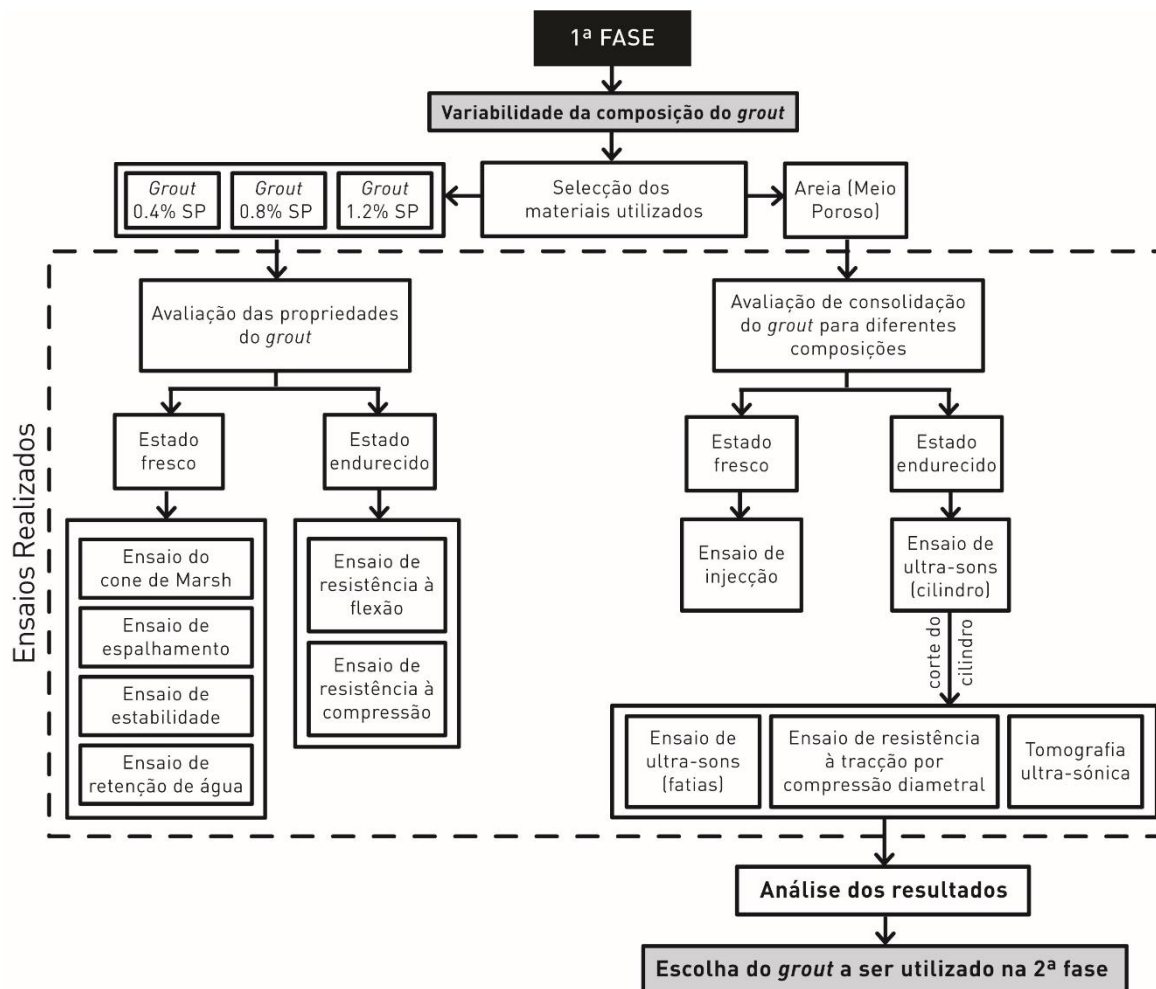
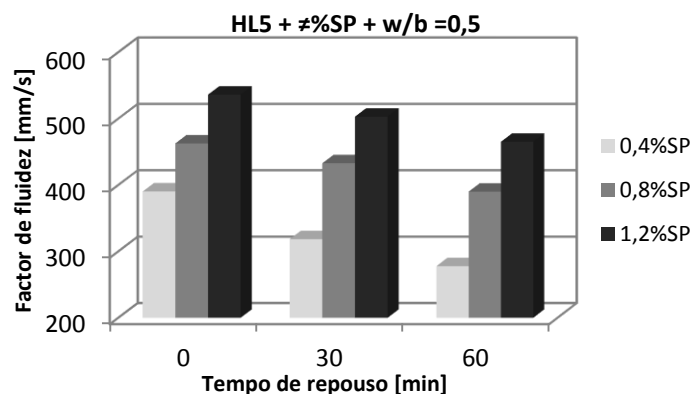


Figura 4.1 – Esquema representativo do processo de seleção do tipo de *grout* a ser utilizado na 2ª fase da campanha experimental

## 4.2. Avaliação das propriedades do *grout*

### 4.2.1. Ensaio do cone de Marsh

O ensaio do cone de Marsh foi utilizado para estudar a perda de fluidez de diferentes *grouts* ao longo do tempo, tal como recomendado por Aïtcin (Aïtcin, 1998). Neste trabalho, a fluidez do *grout* foi analisada em três instantes distintos: imediatamente após a sua produção (0 min), e após um tempo de repouso de 30 minutos e 60 minutos, respectivamente. Para cada instante foram testadas dosagens de 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante na composição do *grout*. Na figura 4.2 são apresentados os valores da fluidez obtidos no ensaio do cone.



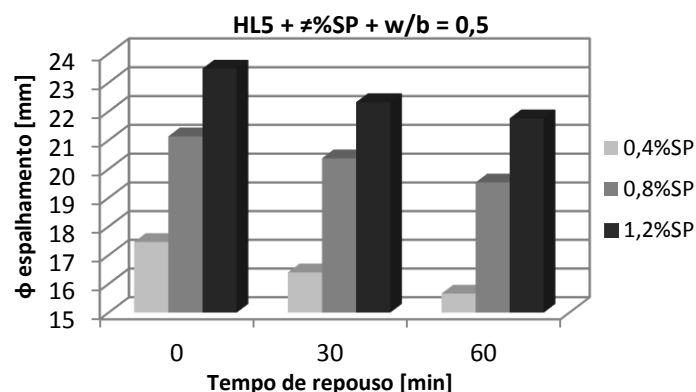
**Figura 4.2 – Influência da dosagem de superplastificante sobre o factor de fluidez para 0, 30 e 60 minutos de tempo de repouso após preparação do *grout***

Fazendo uma análise comparativa entre os diferentes *grouts*, é possível constatar que o aumento da dosagem de superplastificante na composição do *grout* contribui visivelmente para o aumento da sua fluidez. Um *grout* com 0,4% de superplastificante possui um factor de fluidez em 60 minutos demasiado baixo quando comparado com as outras duas composições.

Outro aspecto ilustrado na figura 4.2 mostra que a variação do factor de fluidez entre a dosagem mais elevada e a dosagem mais baixa de superplastificante é tanto maior quanto maior for o tempo de repouso. Este comportamento pode ser atribuído a uma maior quantidade de superplastificante disponível durante o ensaio que contribui para uma maior dispersão das partículas de *grout*, uma vez que o superplastificante impõe forças repulsivas que impedem a floculação de partículas (Banfill, 2011). Por essa razão, esta acção característica do superplastificante é mais importante quanto mais longo for o tempo de repouso que antecede o ensaio.

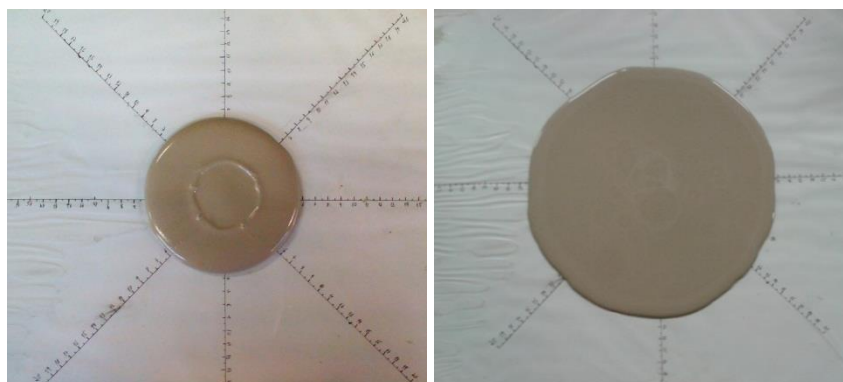
#### **4.2.2. Ensaio de espalhamento**

À semelhança do ensaio do cone de Marsh, no ensaio de espalhamento foi também estudada a influência do superplastificante na fluidez de *grouts* de cal hidráulica para os mesmos tempos de repouso (0, 30 e 60 minutos, respectivamente). Na figura 4.3 apresentam-se os resultados da fluidez dos diferentes tipos de *grout*, segundo o diâmetro de espalhamento (em mm) e em função dos diferentes instantes estudados.



**Figura 4.3 – Influência da dosagem de superplastificante no diâmetro de espalhamento para 0, 30 e 60 minutos de tempo de repouso após a preparação do *grout***

Tal como nos resultados obtidos para o ensaio do cone de Marsh (vd. figura 4.2), para o ensaio de espalhamento verifica-se que uma maior trabalhabilidade do *grout* está associada a uma dosagem de superplastificante mais elevada. Na verdade, independentemente do tempo de repouso, pode ser detectada uma diferença significativa no diâmetro de espalhamento entre 0,4 e 1,2% de superplastificante (figura 4.4). A redução da fluidez, quando avaliada segundo este método, reflecte-se na obtenção de um menor valor de espalhamento. Alguns autores [(Svermova et al., 2003), (Sonebi et al., 2013), (Yamada et al., 2000)] também notaram que, devido a uma melhor desfloculação das partículas na suspensão, a dosagem de superplastificante possui um grande efeito sobre os resultados de espalhamento. Além disso, como pode ser observado na figura 4.3, para maiores tempos de repouso surgem menores diâmetros de espalhamento, o que está relacionado com a perda de trabalhabilidade do *grout*. Os resultados de avaliação da fluidez pelo método do espalhamento correlacionam-se, de forma negativa, com a tensão de cedência do material (Roussel & Le Roy, 2004), isto é, a um maior diâmetro de espalhamento corresponde uma tensão de cedência menor. Este menor valor da tensão de cedência pode ser explicado pela presença do superplastificante que promove a dispersão das partículas sólidas da suspensão. Face aos resultados obtidos, é possível afirmar que o ensaio de espalhamento é bastante sensível à capacidade de escoamento do *grout* que, por sua vez, está relacionado com o parâmetro reológico – tensão de cedência.



**Figura 4.4 – Diâmetro de espalhamento de *grout* com 0,4 % (esq.) e 1,2 % (dir.) de superplastificante**

### 4.2.3. Ensaio de estabilidade

De acordo com Miltiadou-Fezans (Miltiadou-Fezans & Tassios, 2013), as propriedades física e química na fase sólida e a possível presença e quantidade de quaisquer aditivos são factores importantes na estabilidade de uma suspensão, à medida que intervêm no equilíbrio das forças inter-partículas. Assim, foi analisado neste estudo o efeito da dosagem de superplastificante sobre a estabilidade do *grout*. De forma a avaliar a estabilidade da mistura de *grout*, foi registada a percentagem da massa volúmica de *grout* em relação à massa volúmica inicial, até 70 minutos após o processo de mistura.

Como se pode observar na figura 4.5, no que diz respeito à dosagem de superplastificante, o seu aumento melhora a estabilidade do *grout*. Como a acção dispersiva do superplastificante se opõe à sedimentação (porque menos quantidade de água é livre de sair, como se observará mais adiante em 4.2.4), o processo de sedimentação ocorre mais lentamente e as partículas posicionam-se de forma mais homogénea (Assaad & Daou, 2014).

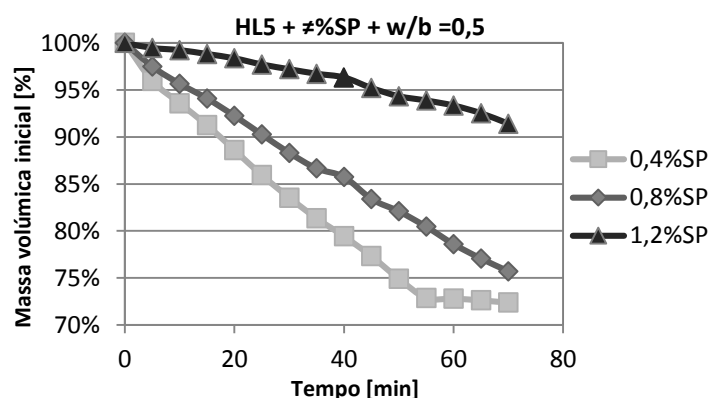


Figura 4.5 – Percentagem de massa volúmica inicial em função do tempo para diferentes dosagens superplastificante, de acordo com o ensaio de estabilidade proposto

### 4.2.4. Ensaio de retenção de água

No caso de alteração da dosagem de superplastificante, o grau de dispersão (dependente da dosagem de superplastificante) determina a capacidade de retenção de água na suspensão do *grout*, uma vez que permite que mais partículas de ligante sejam humedecidas ou, por outras palavras, que mais água seja absorvida na superfície das partículas e menos água livre de sair (Biçer-Şimşir et al., 2009). Como se pode observar na figura 4.6, este fenómeno tem mais impacto para a dosagem de 1,2% de superplastificante. É possível constatar que consoante o aumento da dosagem de superplastificante na composição do *grout*, maior é a capacidade de retenção de água. Isto significa que existe uma melhor ligação entre as moléculas de água e as partículas de ligante, resultando num

incremento da conexão ao nível da microestrutura do *grout*. Este comportamento associado a uma maior quantidade de superplastificante irá, consequentemente, permitir obter um maior grau de fluidez do *grout* dentro do meio poroso a injectar.

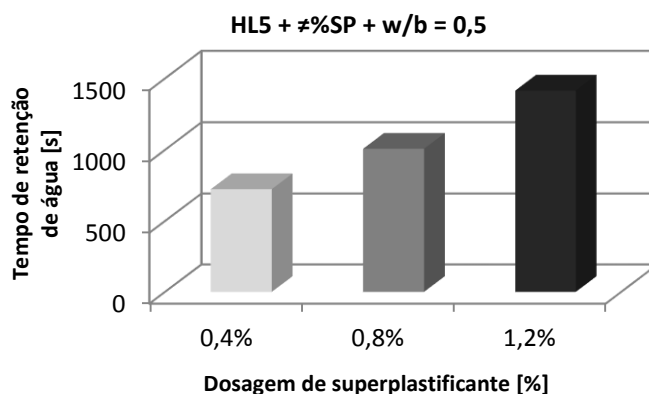


Figura 4.6 – Influência da dosagem de superplastificante no tempo de retenção de água

#### 4.2.5. Ensaio de determinação das resistências à flexão e à compressão

Nesta secção são apresentados e analisados os resultados obtidos na campanha experimental referida em 3.1.4.1, onde os provetes constituídos por *grout* com as diferentes dosagens de superplastificante são ensaiados à flexão e à compressão. No quadro 4.1 apresentam-se as diferenças de resistência mecânica dos *grouts* em estudo que, como expectável, apresentam maiores valores em ambos os ensaios consoante a maior presença de superplastificante. Os valores de resistência à flexão e à compressão apresentados neste quadro foram calculados segundo a equação 3.1 e equação 3.2, respectivamente, presentes em 3.1.4.1. Refira-se que estes resultados que se apresentam em seguida correspondem à média dos valores obtidos em 9 provetes com 28 dias de idade, para cada tipo de *grout*.

Quadro 4.1 – Tensão de resistência à flexão e à compressão dos *grouts* em estudo

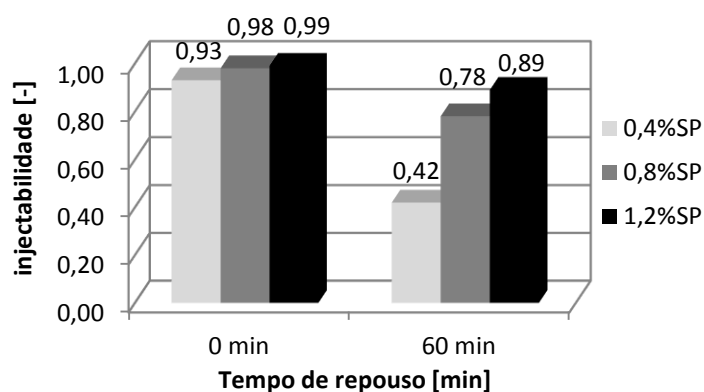
	<i>Grout</i> 0,4%SP	<i>Grout</i> 0,8%SP	<i>Grout</i> 1,2%SP
Tensão de resistência à flexão [MPa]	1,48	2,08	2,41
Tensão de resistência à compressão [MPa]	4,53	5,11	5,57

### 4.3. Avaliação da consolidação do *grout* para as diferentes composições

#### 4.3.1. Ensaio de injeção

Nesta fase da campanha experimental apenas foram realizados ensaios de injeção de *grout* no meio poroso composto por areia. É importante lembrar que o estudo deste meio poroso insere-se num estudo mais amplo, entre outros trabalhos, em que a areia foi também o material escolhido. O principal objectivo deste estudo consiste na comparação do desempenho dos três *grouts* seleccionados (*grout* com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante, respectivamente) em termos de injectabilidade. O *grout* com maior capacidade de penetração no meio poroso e que evidenciar melhores resultados a nível de injeção será alvo de um outro estudo que se apresenta no capítulo seguinte.

Na figura 4.7 apresentam-se os resultados de injectabilidade do *grout* obtidos para as diferentes quantidades de superplastificante para um tempo de repouso do *grout* (0 min e 60 min, respectivamente).



**Figura 4.7 – Influência da dosagem de superplastificante na injectabilidade do *grout* para diferentes tempos de repouso (0min e 60 min, respectivamente)**

A partir da análise dos dados presentes na figura 4.7 é possível concluir que a variação da quantidade de superplastificante na composição do *grout* provoca uma influência nos níveis de injectabilidade. Os resultados mostram, logicamente, que *grouts* com menor dosagem de superplastificante apresentam menor injectabilidade, quer para um tempo de repouso de 0 minutos, quer para um tempo de repouso de 60 minutos. Tratando-se do mesmo meio poroso (areia) em todas as injeções realizadas, a resposta para este comportamento centra-se na variabilidade da composição do *grout* tendo em conta as suas propriedades frescas. Este comportamento confirma os resultados obtidos anteriormente no estudo do *grout* fresco, em que o *grout* com 0,4% de superplastificante conduz a um pior comportamento reológico do *grout*, isto é, a uma viscosidade plástica e uma tensão de cedência superiores. Estas duas grandezas, como já se mencionou anteriormente, condicionam o escoamento do *grout* e a sua capacidade de fluir entre as partículas do meio poroso. Para além dos



parâmetros reológicos, o fenómeno da floculação é particularmente importante na injeção de *grout*, pois varia em função do tempo de repouso (Van Rickstal, 2000). Os resultados mostram que *grouts* em maior estado de floculação apresentam mais dificuldade de injectabilidade, devido à existência de mais forças de atracção entre as partículas do *grout*. Estas forças de atracção traduzidas por uma combinação de interacções de Van-der-Waal's e forças electroestáticas causam uma menor dispersão das partículas do *grout*, levando a que o *grout* tenha menor injectabilidade.

Outra curiosidade que é possível constatar em todos os *grouts* injectados, é que não existe uma variação tão acentuada nos resultados de injectabilidade para um tempo de repouso de 0 minutos como existe para 60 minutos. Tal pode ser explicado por uma maior difusão de *grout* nas injeções a 0 minutos. A 60 minutos, provavelmente devido a uma taxa de floculação elevada, podem surgir zonas de difícil ou de mesmo impossível acesso (penetração) por parte do *grout*, o que leva a menores injectabilidades. Ao longo do tempo em que o *grout* se encontra em repouso existe maior tendência para as partículas sólidas do *grout* se agruparem, o que leva a uma perda da sua trabalhabilidade e, consequentemente, a uma menor capacidade de injeção do *grout*.

Pode observar-se na figura 4.8 um exemplo da situação acima referida após o processo de cura, de uma amostra em que se utilizou o *grout* com 0,4% de superplastificante com um tempo de repouso de 60 minutos.



**Figura 4.8 – Exemplo da amostra de areia injectada com *grout* com 0,4% de superplastificante para um tempo de repouso de 60 min (face superior da fatia da base)**

#### **4.3.2. Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral**

De seguida apresentam-se os resultados provenientes dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral, com o objectivo de avaliar a influência do superplastificante na microestrutura do *grout* injectado e, consequentemente, na ligação ao meio poroso. No quadro 4.2 podem observar-se os resultados das amostras de areia com as quantidades de 0,4%, 0,8% e 1,2% de

superplastificante para um tempo de repouso de 0 minutos.

Para a classificação do estado da injeção em função da altura do provete, adicionou-se o parâmetro “Gradiente”. Para o ensaio mecânico o gradiente encontra-se nas unidades descritas. Contudo, para o ensaio de ultra-sons, optou-se por classificar o gradiente com os símbolos: (+) para positivo, (-) para negativo, e (X) para um gradiente nulo ou inexistente.

**Quadro 4.2 – Amostras de areia; 0 min: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral**

Amostra		Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
		Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
		Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0,4%SP	0min	2257	2394	2124	2258	-	0,50	0,65	0,38	0,51	-0.72
0,8%SP	0min	2391	2441	2409	2414	+	0,62	0,70	0,63	0,65	0,07
1,2%SP	0min	3190	3269	3257	3239	+	1,10	1,20	1,10	1,13	0,00

Começando por fazer uma análise global aos dois conjuntos de resultados obtidos, pode concluir-se que os piores resultados dão-se para as amostras com 0,4% de superplastificante e, obviamente, os melhores para 1,2% de superplastificante. Os ensaios de resistência à tracção por compressão diametral corroboram os valores obtidos de velocidades ultra-sónicas, apresentando gradientes relativamente semelhantes. Analisando o resultado das amostras com 0,4% de superplastificante verifica-se um gradiente negativo, quer para o ensaio mecânico, quer para o ensaio não-destrutivo. Com efeito, os baixos valores de resistência à tracção por compressão diametral e de ultra-sons reflectem um pior comportamento em altura, especialmente na fatia do topo. No caso das amostras com 0,8% de superplastificante, ambos os ensaios apresentam gradientes positivos, contudo o gradiente referente ao ensaio mecânico é muito próximo de zero, pelo que quase se pode considerar nulo. No caso das amostras com 1,2% de superplastificante, estas já apresentam mesmo um gradiente nulo para o ensaio mecânico.

Este conjunto de resultados obtidos tem uma razão. Como se viu em 4.3.1, *grouts* com menor dosagem de superplastificante apresentam maior dificuldade de penetração no meio poroso, fruto da fraca acção de dispersão das partículas do *grout*. Quanto menor a quantidade de superplastificante aplicada, menor será a intensidade do mecanismo de acção de dispersão das partículas do *grout*, havendo maiores probabilidades de ocorrência de fenómenos de floculação. O fraco preenchimento de *grout* resultante destes fenómenos origina um maior número de vazios, que se traduz em piores valores de velocidade de ultra-sons e, posteriormente, de resistência à tracção por compressão diametral.

Além disso, outro ponto possível de verificar no quadro 4.2 é que em todas as amostras os valores de resistência à tracção por compressão diametral e de velocidade de ultra-sons correspondentes às fatias do meio são superiores às restantes fatias. Estes resultados indiciam um

maior grau de compacidade nesta zona do provete, assim como uma melhor ligação do *grout* às partículas do meio poroso.

**Quadro 4.3 – Amostras de areia; 60 min: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral**

Amostra		Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
		Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
		Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
0,4%SP	60min	2084	X	X	2084	X	0,43	X	X	0,43	X
0,8%SP	60min	2392	2414	2285	2364	-	0,61	0,66	0,47	0,58	-0,88
1,2%SP	60min	2938	3139	2869	2982	-	0,95	1,01	0,85	0,94	-0,63

Observando o quadro 4.3, pode constatar-se que os resultados obtidos para um tempo de repouso de 60 minutos são, em parte, semelhantes aos analisados acima, na medida em que as amostras injectadas com 0,4% de superplastificante apresentam claramente os piores valores em ambos os ensaios, seguidos pelas amostras com 0,8%, e por último pelas amostras com 1,2%, com melhores valores. As amostras com 0,4% de superplastificante conseguem destacar-se logo à partida devido ao facto de apenas terem sofrido uma injeção parcial, sendo apenas possível observar-se os resultados referentes à única fatia obtida, a da base.

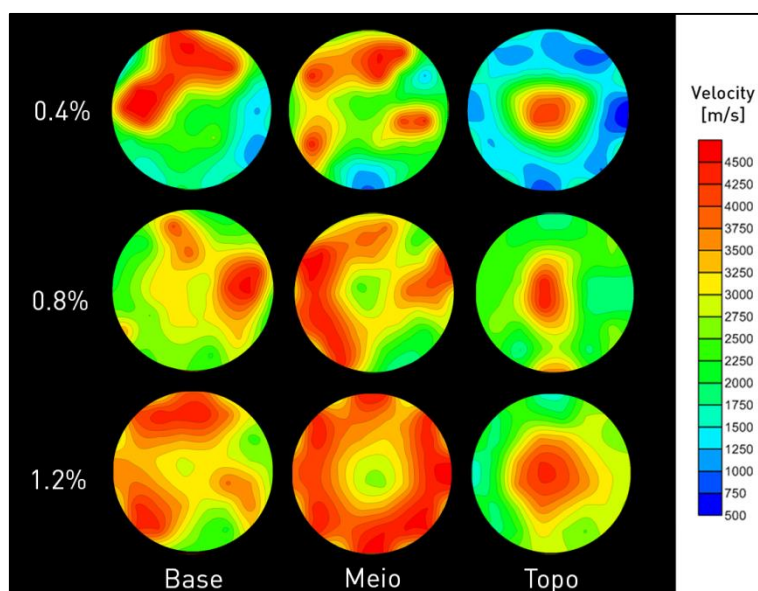
A redução da injectabilidade de *grouts* com um tempo de repouso de 60 minutos tem uma razão. Estes *grouts* atingem um estado de floculação avançado no qual se estabelecem ligações permanentes (e irreversíveis) entre as partículas, ou seja, estas ficam impedidas de se separar mesmo que se volte a aplicar uma taxa de corte à mistura. Esta floculação permanente que impossibilita o *grout* de voltar ao estado inicial leva a que as zonas mais afastadas do ponto de injeção sejam mais difíceis de o *grout* penetrar, originando pequenas zonas não injectáveis, que se traduzem em piores resultados registados nos ensaios (Guerreiro, 2014). Como exemplo deste fenómeno são os valores das amostras com 0,4% de superplastificante, bem como os gradientes negativos das restantes amostras referentes aos ensaios de velocidade de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral.

À semelhança dos resultados do ensaio de injeção apresentados anteriormente (vd. 4.3.1), é também possível verificar que existe uma conformidade de resultados entre 0 e 60 minutos de tempo de repouso do *grout* nos ensaios ultra-sónicos e mecânicos. Existe uma maior homogeneidade nas injeções a 0 minutos, enquanto que a 60 minutos, devido à menor trabalhabilidade do *grout*, obtêm-se zonas mais heterogéneas provocando as diferenças obtidas entre os dois conjuntos de resultados.

### 4.3.3. Tomogramas ultra-sónicos

Nesta secção são apresentados os resultados das mesmas amostras analisadas acima, com recurso à técnica de tomografia ultra-sónica, já descrita no capítulo anterior (vd. 3.2.3.3). Tal como anteriormente, a exposição dos resultados é efectuada de acordo com a tipologia das amostras, onde são apresentados os tomogramas das secções horizontais (2D) referentes a cada uma das fatias (base, meio e topo). Posteriormente, comparam-se os tomogramas com as imagens reais respectivas e com os resultados dos ensaios apresentados na secção anterior (vd. 4.3.2). De igual modo, a fim de avaliar a eficácia desta técnica, é feito o mesmo procedimento para os tomogramas ultra-sónicos 3D.

Na figura 4.9 apresentam-se os tomogramas ultra-sónicos referentes às amostras com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante sem tempo de repouso (0 min).



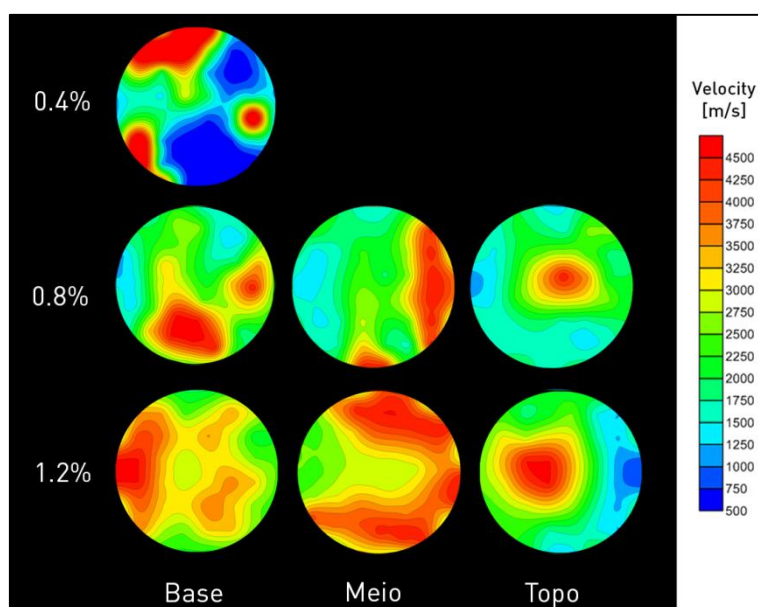
**Figura 4.9 – Amostras de areia; 0 min: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante**

A análise das imagens tomográficas presentes na figura 4.9 é pouco esclarecedora nos casos das amostras com 0,8% e 1,2% de superplastificante, principalmente no que respeita à comparação entre as velocidades médias das fatias da base e do topo em cada amostra. Apesar de existir uma ligeira tendência de aumento da velocidade de ultra-sons da fatia da base para a fatia do topo em ambas as amostras, comprovada pelos resultados obtidos em 4.3.2, a maior quantidade de tons esverdeados na fatia do topo parecem indicar o contrário. No entanto, sendo que os resultados das velocidades ultra-sónicas apresentam um valor relativamente próximo e observando as respectivas imagens tomográficas, pode afirmar-se que existiu uma homogeneidade da injeção de *grout* nestas duas situações. Contrariamente, na amostra com 0,4% de superplastificante, verificou-se uma diminuição das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura do provete, facto verdadeiramente visível

através da comparação da quantidade de cor azul ente as fatias da base e do topo.

Fazendo uma análise transversal a todas as amostras, pode observar-se que as fatias pertencentes ao provete injectado com 1,2% de superplastificante são aquelas em que se obtêm melhores resultados, visto que apresentam cores mais avermelhadas, que correspondem a zonas com velocidades ultra-sónicas acima de 3500 m/s. Por outro lado, as fatias em que se utilizou uma quantidade de 0,4% de superplastificante são as que apresentam piores resultados, com cores mais azuladas, respeitantes a zonas com velocidades ultra-sónicas inferiores a 1500 m/s. É também possível constatar que a fatia do meio é aquela que apresenta melhores resultados em todas as amostras. Pode afirmar-se que, de certa forma, estes resultados dos tomogramas corroboram os resultados obtidos anteriormente (vd. 4.3.2), quer para o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, quer para o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.

Em seguida, são apresentados na figura 4.10 os tomogramas referentes às amostras com as mesmas quantidades de superplastificante, mas sujeitas a um tempo de repouso de 60 minutos.



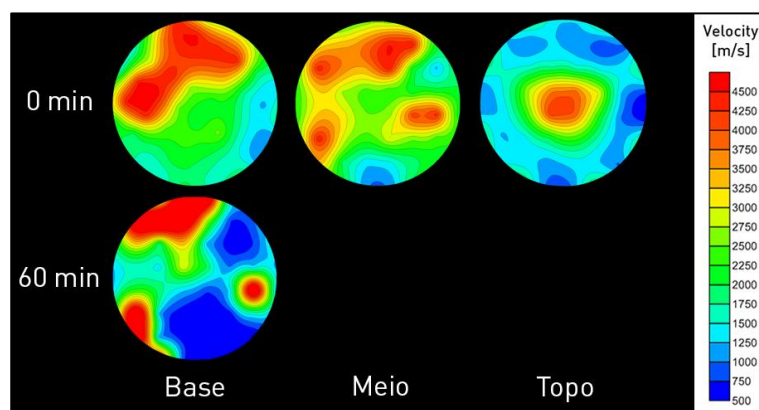
**Figura 4.10 – Amostras de areia; 60 min: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras com 0,4%, 0,8% e 1,2% de superplastificante**

Os tomogramas relativos às amostras com um tempo de repouso de 60 minutos evidenciam uma tendência global de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o topo das amostras. Esta evidência pode facilmente compreender-se através da análise da dimensão das áreas correspondentes a velocidades ultra-sónicas superiores a 3500 m/s (representadas a vermelho). No caso da amostra com 0,4% de superplastificante apenas é possível visualizar o tomograma referente à fatia da base pois, como já foi visto na secção anterior (vd. 4.3.2), a injeção do *grout* foi parcial (*grout* não atingiu o topo do cilindro).

Fazendo uma análise comparativa às amostras sem tempo de repouso, a primeira evidência

que se pode observar é que nos tomogramas provenientes das amostras com um tempo de repouso de 60 minutos existe uma maior presença de zonas com cor azul, que representam áreas com baixas velocidades ultra-sónicas (inferiores a 1500 m/s). Tal como para as amostras sem tempo de repouso apresentadas acima (vd. figura 4.9), verificaram-se que os melhores valores de velocidades ultra-sónicas foram obtidos nas amostras com 1,2% de superplastificante, seguidos das amostras com 0,8% e 0,4%, respectivamente. Estes tomogramas corroboram as conclusões anteriormente retiradas em 4.3.2, uma vez que semelhantes hierarquias de velocidades de ultra-sons foram verificadas. Outra evidência que se pode constatar, à semelhança das amostras sem tempo de repouso, é que nas amostras que injectaram na sua totalidade (amostras com 0,8% e 1,2% de superplastificante), a fatia do meio é a que corresponde aos melhores resultados tomográficos, tal como observado por Guerreiro (Guerreiro, 2014).

Seguidamente, analisam-se apenas os tomogramas referentes às amostras com 0,4% de superplastificante, para os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min), que se apresentam na figura 4.11.



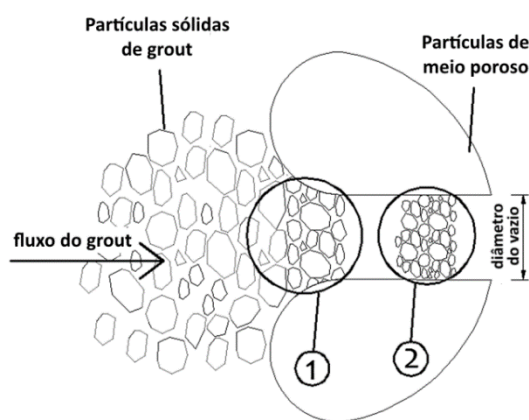
**Figura 4.11 – Amostras de areia; 0,4%SP: Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras com os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min, respectivamente)**

A análise entre estas duas amostras com 0,4% de superplastificante não pode ser totalmente efectuada, pois apenas foi possível obter os tomogramas ultra-sónicos da fatia da base para o caso do tempo de repouso de 60 minutos. Desta forma, apenas se pode afirmar que, relativamente à fatia da base, a amostra sujeita a um tempo de repouso de 60 minutos apresenta uma área mais abrangente de cor azul escura, onde se registaram velocidades ultra-sónicas inferiores a 1200 m/s. Este resultado vem, mais uma vez, de encontro aos obtidos em 4.3.2, no qual se verificou um pior registo das resistências mecânicas da amostra com tempo de repouso de 60 minutos comparativamente à amostra sem tempo de repouso (0 min), essencialmente fruto da menor presença de *grout*.

Como o *grout* foi injectado após 60 minutos de repouso, houve tempo para que este alcançasse um maior estado de flocculação. Este comportamento, tal como já explicado anteriormente, manifesta-

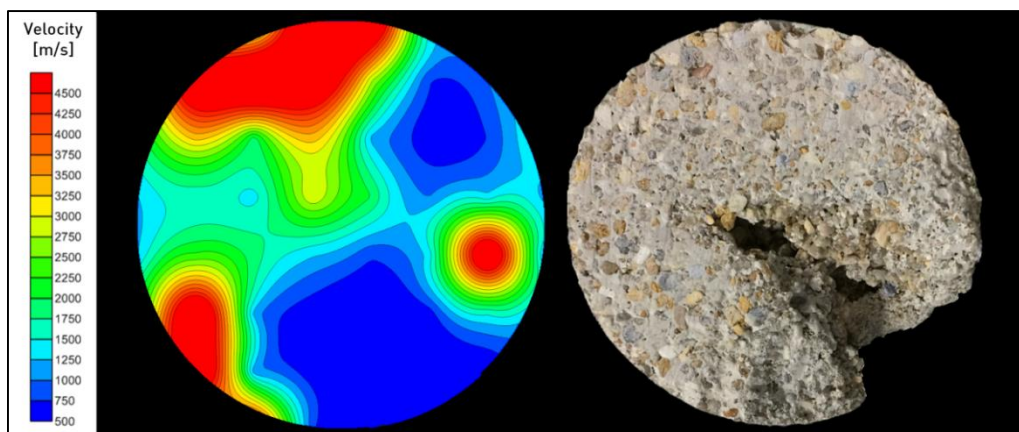


se através de uma maior tendência das partículas sólidas do *grout* em se agruparem, o que origina uma menor capacidade de injectabilidade. Neste caso, crê-se que esse estado avançado de floculação associado à menor dosagem de superplastificante, contribuiu para a ocorrência de um fenómeno que por vezes acontece, denominado por filtração do *grout* (“*filtration tendency*”, em inglês). Tal como ilustrado na figura 4.12, este fenómeno ocorre quando um aglomerado de partículas de *grout* se acumula na entrada ou no interior dos poros ou vazios, impedindo o fluxo de *grout* e a penetração adicional [(Eklund & Stille, 2008), (Jorne et al., 2015b)]. A ocorrência destes fenómenos conduz a que o *grout* capaz de penetrar nos poros possua menos partículas de ligante do que seria o ideal e seja mais fluido (altera-se a relação água/ligante da composição do *grout*), com menor capacidade para efectuar ligações fortes entre a parede do poro e o *grout*.



**Figura 4.12 – Formação de aglomerado flocular: na entrada do vazio (1), no interior do vazio (2)**  
(adaptado de ((Jorne et al., 2015b))

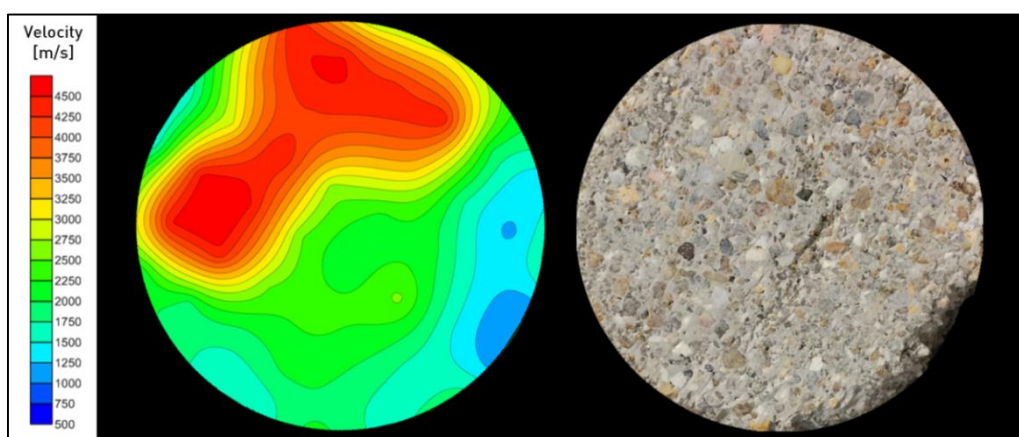
Como se pode observar na figura 4.13, crê-se que os aglomerados floculares obstruíram efectivamente a passagem do *grout*. Apesar de se ter utilizado superplastificante, este não foi em quantidade suficiente para contribuir na fluidez do *grout* e consequentemente na penetração dentro do meio poroso. É possível constatar no tomograma relativo à amostra com 60 minutos de tempo de repouso e na respectiva fotografia, um vazio de grande dimensão onde foram registadas as piores velocidades ultra-sónicas (preenchidas a azul escuro). Consequentemente, os valores de resistência mecânica são igualmente baixos, estando em consonância com resultados obtidos em 4.3.2.



**Figura 4.13 – Amostra de areia; 0,4%SP, 60min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base**

Efectivamente, o fenómeno de filtração do *grout* pode ser atenuado através da utilização de superplastificantes. A utilização do superplastificante na composição do *grout* confere às partículas do ligante uma carga negativa superficial provocando uma repulsão entre elas. Contudo, mesmo para o caso sem tempo de repouso, a quantidade de 0,4% de superplastificante não foi suficiente para garantir uma fluidez que permita uma penetração eficaz dentro do meio poroso. Como se pode verificar através dos tomogramas ultra-sónicos, crê-se que as baixas velocidades ultra-sónicas associadas às zonas com cores azuladas denunciam a ocorrência de fenómenos de filtração e consequentes bloqueios à passagem de *grout*, ainda que menos gravosas comparativamente ao caso com tempo de repouso.

A figura seguinte (figura 4.14) do tomograma e da respectiva fotografia comprovam as conclusões retiradas acerca da fatia da base da amostra com 0,4% de superplastificante sem tempo de repouso.



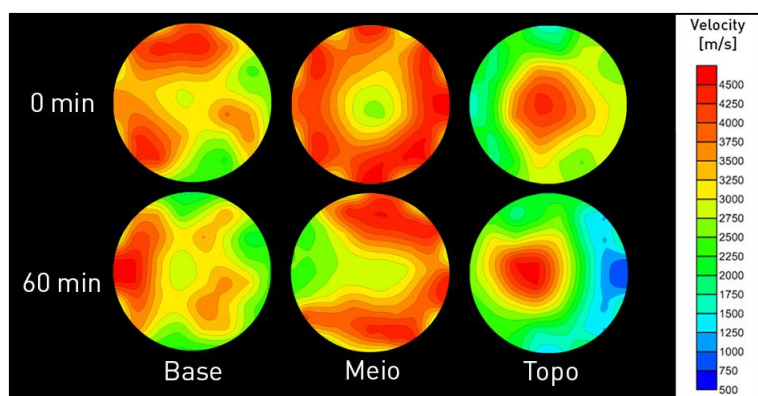
**Figura 4.14 – Amostra de areia; 0,4%SP, 0min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base**

Seguidamente, de forma a obter um melhor termo de comparação com as amostras com 0,4%



de superplastificante, são apenas apresentadas as imagens tomográficas das amostras com 1,2%. Deste modo é possível obter uma melhor percepção do efeito do superplastificante na injectabilidade do *grout* dentro do meio poroso.

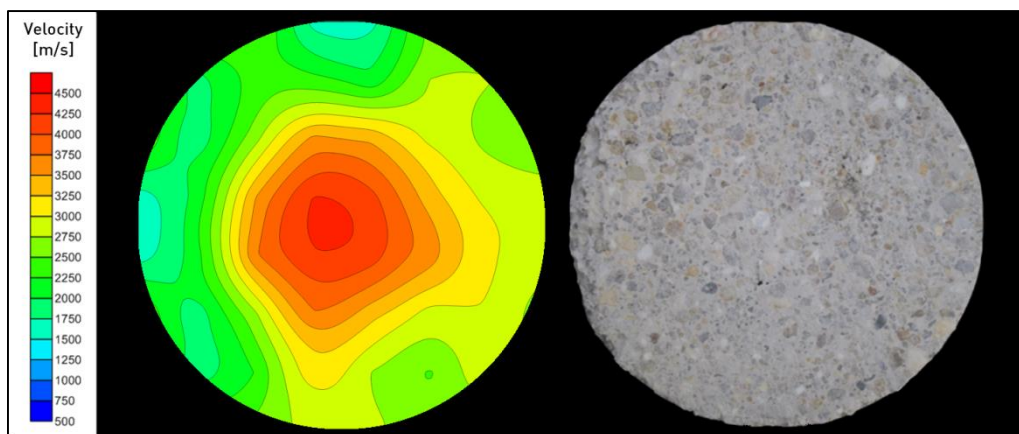
Através da figura 4.15 podem ser visualizadas as imagens tomográficas referentes às amostras com 1,2% de superplastificante para os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min).



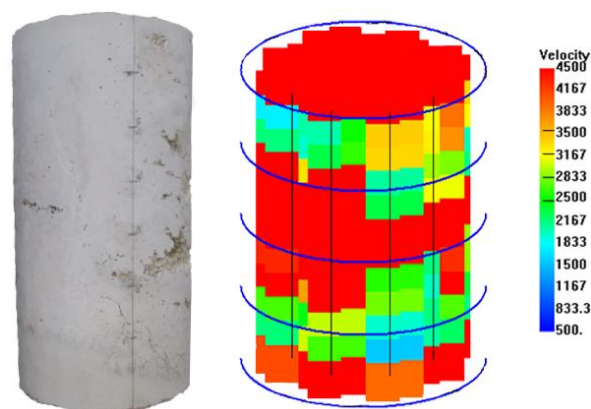
**Figura 4.15 – Amostras de areia; 1,2%SP: Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras com os diferentes tempos de repouso (0 min e 60 min, respectivamente)**

Analisando os tomogramas referentes às amostras com 1,2% de superplastificante, é possível verificar que, nas amostras sem tempo de repouso, existe um ligeiro aumento das velocidades ultra-sónicas da base para o topo do provete. Contudo, observando os tomogramas relativos a essa amostra, não se notam grandes diferenças de cores entre as três fatias, pois os valores de velocidades registados no ensaio de ultra-sons são aproximadamente constantes e acima dos 3000 m/s (vd. quadro 4.2). Por observação da fatia do topo, zona mais afastada do local de entrada de injeção, conclui-se que existe uma boa capacidade de injeção do *grout* em altura, devido ao facto de o *grout* conseguir manter as suas propriedades no estado fresco praticamente inalteradas.

Estes resultados podem ser comprovados através da figura 4.16, que representa o tomograma 2D e a respectiva fotografia do plano superior da fatia do topo, e da figura 4.17 que representa o tomograma 3D e a correspondente fotografia do provete inteiro.

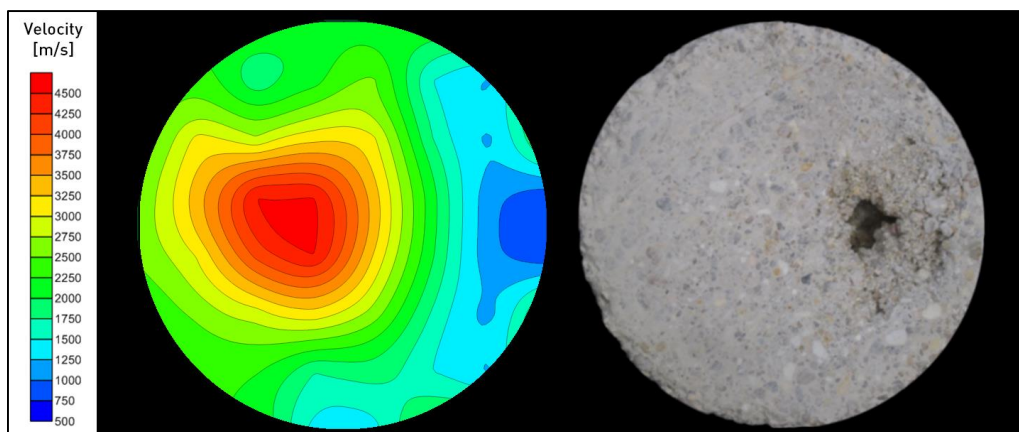


**Figura 4.16 – Amostra de areia; 1,2%SP, 0min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

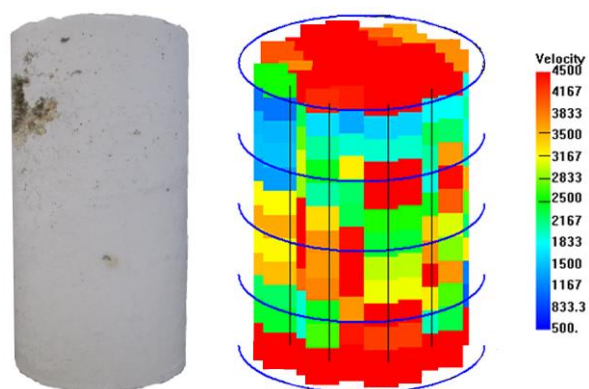


**Figura 4.17 – Amostra de areia; 1,2%SP, 0 min: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) do cilindro**

Para um tempo de repouso de 60 minutos, o *grout* apresenta ligeiras dificuldades de injectabilidade, perdendo uma certa fluidez nas partes mais afastadas do local de entrada da injeção. Tal pode ser explicado por um maior estado de floculação que o *grout* apresenta, embora (como se viu anteriormente em 4.3.2) este fenómeno não seja tão evidente como para *grouts* com menor dosagem de superplastificante. No caso das amostras sujeitas a um tempo de repouso de 60 minutos, existe uma tendência de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o topo do provete, destacando-se a presença de zonas com cor azul na fatia do topo. Nesta fatia, apesar de surgir uma zona com a cor vermelha, esta não compensa o facto de existir uma grande área com cores azuis que representam um grande vazio. Uma possível causa para a presença dessa mancha vermelha pode estar no facto de o *grout*, sendo incapaz de penetrar na zona em que acabou por surgir o vazio, acumular-se na zona oposta originando valores elevados de velocidades ultra-sónicas. Tal pode ser comprovado pelas imagens apresentadas na figura 4.18, na qual se apresenta o tomograma ultra-sónico da fatia do topo em 2D e respectiva fotografia. Igualmente, através da figura 4.19, pode visualizar-se na fotografia do provete inteiro, o vazio deixado pela ausência de *grout* e o respectivo tomograma 3D representando as baixas velocidades ultra-sónicas a azul.



**Figura 4.18 – Amostra de areia; 1,2%SP, 60min: Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**



**Figura 4.19 – Amostra de areia; 1,2%SP, 60 min: fotografia (esq.) e tomograma 3D (dir.) do cilindro**

#### **4.4. Considerações finais acerca dos ensaios realizados**

Com base nos resultados experimentais, é possível concluir que o superplastificante possui um papel importante nas propriedades do *grout* à base de cal hidráulica, quer no estado fresco, quer no estado endurecido. Como já se viu, o superplastificante contribui para um melhor desempenho do *grout*, uma vez que impõe forças repulsivas (repulsões estéricas e electroestáticas) entre as partículas de ligante. Esta acção de repulsão contribui para manter as partículas suficientemente afastadas e evitar que floculem (acção de desfloculação), resultando numa maior fluidez (superior factor de fluidez e maior diâmetro de espalhamento). A influência do superplastificante na estabilidade e na capacidade de retenção de água é igualmente clara. A referida acção de dispersão contraria o fenómeno de sedimentação das partículas de *grout*, uma vez que este se processa de uma forma mais lenta, resultando assim numa mistura mais homogénea. Simultaneamente, o superplastificante desflocula as partículas do *grout* conferindo um maior grau de molhabilidade destas e, consequentemente, reduzindo a quantidade de água livre. Além disso, a adição de superplastificante é

igualmente útil no aumento da resistência mecânica do *grout*. Na verdade, o superplastificante não reage por acção química com produtos hidratados, mas afecta a microestrutura do *grout*, e altera a morfologia e tamanho dos produtos de hidratação da cal (Baltazar et al., 2012a). Os resultados obtidos mostram um aumento na resistência à compressão e à flexão dos provetes prismáticos de *grout* com o aumento da dosagem de superplastificante.

Relativamente aos ensaios de injeção de *grout* dentro do meio poroso, é possível constatar que com uma maior quantidade superplastificante a capacidade do *grout* em penetrar nos vazios aumenta. A maior capacidade de retenção de água da composição do *grout* assim como o maior grau de fluidez, conferido pela adição de superplastificante, proporcionam melhores resultados de injectabilidade. Além disso, já com o *grout* no estado endurecido, é também possível verificar através dos ensaios de velocidade de ultra-sons e de resistência mecânica que a maior quantidade de superplastificante na composição do *grout* melhora a ligação das partículas de ligante às partículas do meio poroso, garantido uma boa conexão na zona de interface *grout*/meio poroso.

Recorrendo à técnica de tomografia ultra-sónica, é então comprovado o maior grau de compacidade das amostras que contêm o *grout* com 1,2% de superplastificante na sua composição (correspondente ao *grout* com melhor performance no estado fresco). De referir que, nos tomogramas ultra-sónicos verifica-se uma consonância entre os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons e no ensaio mecânico. Além disso, pode afirmar-se que os tomogramas ultra-sónicos espelham verdadeiramente a realidade do estado interior das amostras, quer pelas imagens em 2D (das fatias), quer pelas imagens em 3D (do provete inteiro), ambas passíveis de comparação com as fotografias respectivas.

Assim, considerando os resultados dos parâmetros de *grout* nos estados fresco e endurecido, parece que produtos como o superplastificante são inevitáveis quando se concebe um *grout* para fins de injeção. Deste modo, entre as três diferentes composições de *grout* estudadas nesta primeira fase da campanha experimental, optou-se escolher para a segunda fase aquela que apresentou melhores resultados na generalidade dos ensaios realizados, ou seja, o *grout* composto com 1,2% de superplastificante.



## 5. REDUÇÃO DA SUCÇÃO DO MEIO POROSO

### 5.1. Introdução

O presente capítulo incide na segunda fase da campanha experimental que tem como objectivo estudar a influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade do *grout* (utilizou-se o *grout* que foi escolhido na primeira fase da campanha experimental, *grout* com 1,2% de superplastificante) e, consequentemente, verificar o seu efeito na redução de absorção de água pelo meio poroso. Assim, foi aplicado um tratamento de superfície nos dois materiais utilizados nesta segunda fase, nomeadamente o material cerâmico e o material calcário. De referir que para cada material foram analisados apenas dois tipos de meio poroso, o tipo A composto por 1/3 de partículas grossas, 1/3 de partículas médias e 1/3 de partículas finas (1/3G, 1/3M, 1/3F), e o tipo B composto por 2/3 de partículas grossas e 1/3 de partículas finas (2/3G, 1/3F). O tratamento de superfície foi apenas aplicado nestes dois tipos de meios poroso, os quais o processo de injeção de *grout* não obteve os melhores resultados em outros trabalhos realizados por outros autores [(Coelho, 2013), (Jorne et al., 2015b)].

Em primeiro lugar foram realizados ensaios complementares aos dois meios porosos em cada material cujo tratamento de superfície foi aplicado, de modo a ser possível uma melhor caracterização dos mesmos. Com efeito, foi efectuada a medição dos diferentes ângulos de contacto com recurso a um goniómetro. Este parâmetro característico irá servir para diferenciar as várias amostras estudadas neste capítulo. Foi também analisada a capacidade de absorção de água dos dois meios porosos referidos em cada material. Posteriormente, foi feita uma avaliação da consolidação do *grout* juntamente com o meio poroso através de ensaios de injeção. A caracterização das propriedades mecânicas das amostras foi efectuada através da análise de resultados de dois tipos de ensaios, já utilizados no capítulo anterior. O ensaio de ultra-sons, não-destrutivo, e o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, destrutivo. Por fim, através da técnica de tomografia ultra-sónica obtém-se uma resolução da qualidade dos resultados obtidos no ensaio de ultra-sons. Deste modo, é possível a comparação de resultados provenientes de dois métodos de avaliação distintos mas com a mesma finalidade, a de analisar o estado interior da amostra.

Na figura 5.1 é apresentado o fluxograma referente a esta segunda fase da campanha experimental onde são apresentados os diferentes ensaios realizados durante a campanha experimental, anteriormente descritos no capítulo 3. Paralelamente, são explanados os resultados em coordenação com a bibliografia já existente e relatada no capítulo 2, com o objectivo de dar resposta às questões que conduziram à realização do presente estudo.

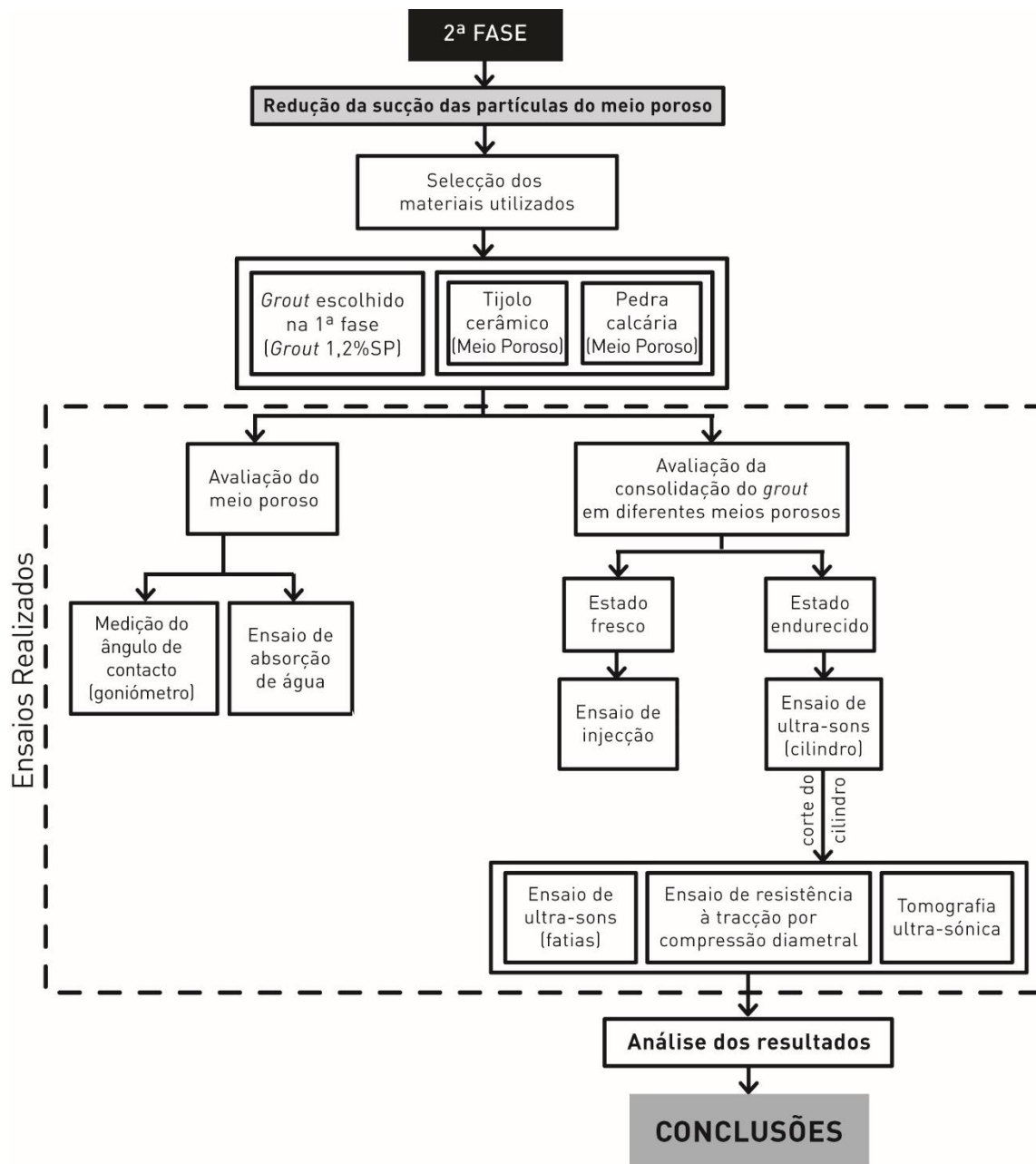
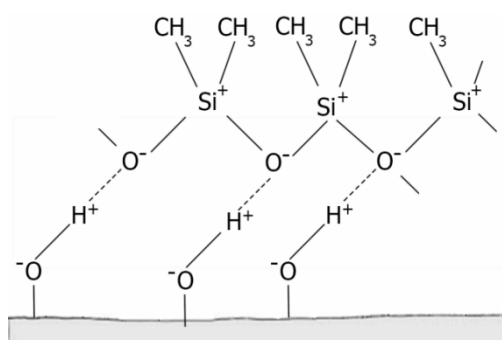


Figura 5.1 – Esquema representativo dos ensaios realizados na 2ª fase da campanha experimental

## 5.2. Aplicação de tratamento de superfície no meio poroso

Como já mencionado no capítulo 2 (vd. 2.3.3), a molhabilidade do meio poroso possui um efeito directo na trabalhabilidade do *grout*, na medida em que existe uma maior absorção de água do *grout* por parte das partículas que constituem o meio poroso. Assim, de modo a diminuir esse efeito e permitir uma melhor fluidez do *grout* no momento da injeção (menor perda de água livre da composição do *grout* para o meio poroso), foi aplicado um tratamento de superfície com características hidrofóbicas, nos dois meios porosos dos dois materiais referidos anteriormente. O

tratamento aplicado consiste numa dissolução de silicone do tipo *polidimetilsiloxano* que tem como objectivo modificar as propriedades da superfície do meio poroso, provocando assim a alteração do ângulo de contacto da superfície porosa quando em contacto com o *grout*. A aplicação do tratamento consiste numa pré-injecção da dissolução de silicone sobre o meio poroso, sendo este posteriormente sujeito a um processo de secagem natural até ao momento que antecede a injecção do *grout*. Trata-se de um tratamento impermeável à água mas permeável ao vapor de água. Ao aplicar-se esta solução hidrófuga, esta reveste os poros dos materiais sem contudo os colmatar nem formar uma película contínua à superfície, exercendo a sua acção através das propriedades de hidro-repelência (Torraca, 1986). Ao todo, foram aplicadas três proporções de água:silicone distintas, nomeadamente as proporções 1:6, 1:4 e 1:2. Não menos importante é o tipo de ligações químicas que se estabelece quando aplicado este tratamento de superfície. Trata-se de uma solução hidrófuga da família dos radical metil, constituída por uma parte mineral ligeiramente polar (Si-O) e por uma parte orgânica não-polar (CH<sub>3</sub>). É relevante referir que as moléculas que constituem esta família de silicones (ou qualquer outra família de silicones) designam-se por moléculas anfipáticas, uma vez que são dotadas das duas partes, polar e não-polar. A parte polar da molécula de silicone é atraída pelos grupos OH da superfície do material, fazendo com que a parte não-polar da molécula seja orientada para o exterior, formando a referida barreira não-polar que não exerce atracção sobre as moléculas de água (figura 5.2). Naturalmente, após a evaporação do solvente ficará apenas presente sobre a superfície sólida a estrutura composta por moléculas orgânicas hidrófobas (grupos CH<sub>3</sub>). Contudo, esta camada que se forma é apenas uma solução paliativa (apresenta uma durabilidade relativa, apenas de alguns anos), pois com o passar do tempo os átomos de hidrogénio e de carbono começam a separar-se, voltando a obter-se uma superfície polar, típica dos materiais de construção correntes.



**Figura 5.2 – Actuação de um silicone sobre uma superfície polar (Torraca, 1986)**



### 5.3. Caracterização do meio poroso

#### 5.3.1. Medição do ângulo de contacto

O estudo do fenómeno da molhabilidade foi caracterizado pela medição do ângulo de contacto entre a gota de líquido, neste caso de água, e a superfície sólida das amostras de material cerâmico e de calcário onde foi aplicado o tratamento de superfície nas três diferentes quantidades referidas (proporções 1:6, 1:4 e 1:2). A determinação dos diferentes ângulos de contacto foi efectuada com recurso a um goniómetro da marca KSV Instruments. Tal como se observa na figura 5.3, as medições foram efectuadas aplicando uma gota de 4 $\mu$ L de água, com uma seringa, sobre a superfície da amostra, e através de uma câmara de videodigital do aparelho eram gravadas imagens sequenciais dos respectivos ângulos de contacto. O ângulo de contacto foi calculado com recurso a um *software* próprio do aparelho e o valor utilizado neste estudo corresponde ao valor médio dos ângulos de contacto medidos à esquerda e à direita da gota. Teve-se o cuidado de escolher a superfície da amostra mais lisa no ponto exacto onde se vertia a gota, de modo a obter o melhor ângulo de contacto possível. Tentou-se ao máximo garantir uma homogeneidade do filme da dissolução de silicone formado na superfície da amostra, de modo a garantir também a sua continuidade. As medições foram efectuadas a uma temperatura de 20 $\pm$ 2°C. Apresentam-se na figura 5.4 as referidas amostras depois de aplicado o tratamento, e no no quadro 5.1 os respectivos resultados do ângulo de contacto obtidos a partir do valor médio de três resultados experimentais para cada amostra. De modo a obter um termo de comparação com as referidas amostras, apresenta-se também a medição do ângulo de contacto em amostras cerâmicas e de calcário sem a aplicação do tratamento hidrófugo, cujos respectivos valores encontram-se igualmente no quadro 5.1.

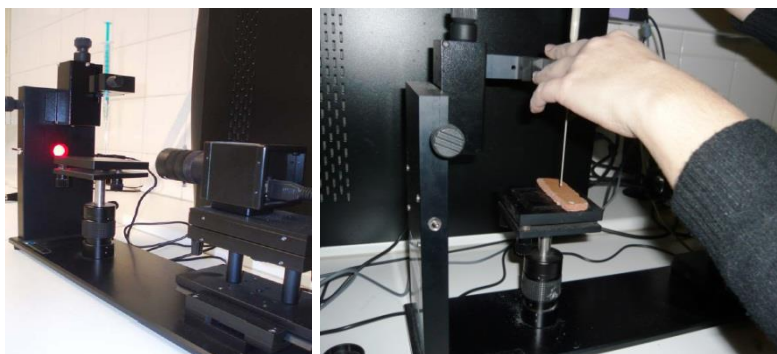


Figura 5.3 – Medição do ângulo de contacto através do goniómetro



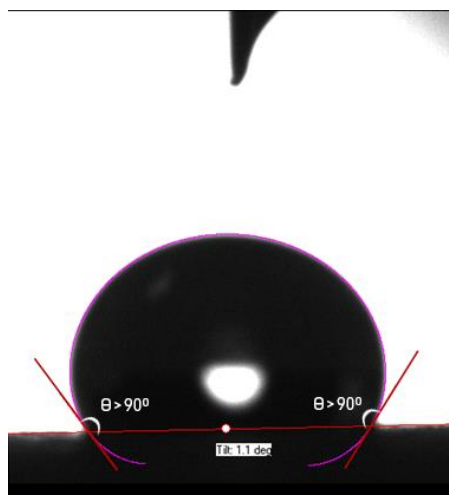
**Figura 5.4 – Diferentes amostras com o tratamento de superfície aplicado**

**Quadro 5.1 – Medições do ângulo de contacto com recurso ao goniómetro**

Amostra	Ângulo de contacto $\theta$ [°]			
	Sem tratamento <sup>a</sup>	Com tratamento (proporção)		
		1:6	1:4	1:2
<b>Material cerâmico</b>	35	97	105	117
<b>Material calcário</b>	48	108	115	120

<sup>a</sup> Resultados obtidos por Jorne (Jorne et al., 2014)

Analisando os valores obtidos, é possível verificar que em ambos os materiais utilizados o ângulo de contacto aumenta à medida que a dosagem de silicone é aplicada em maior quantidade. Naturalmente, nas amostras em que não foi aplicado qualquer tratamento de superfície o ângulo de contacto é menor. Com a aplicação do tratamento sobre a superfície do material verifica-se em todas as amostras um ângulo de contacto superior a 90°, o que significa que as forças de atracção do fluido à superfície são inferiores às forças de coesão do próprio líquido, ou seja, passa a ter um comportamento hidrófobo. Refira-se que, quando o ângulo de contacto é superior a 90°, as moléculas que constituem a superfície sólida são caracterizadas por possuírem as duas propriedades, polares e não-polares (moléculas anfipáticas). E, à medida que esse ângulo de contacto aumenta (com a introdução de uma maior proporção da dissolução de silicone) a superfície sólida irá apresentar um número superior de propriedades não-polares e, por conseguinte, a afinidade entre esta e o fluido diminui. Deste modo, a gota de água passa a ser considerada um fluido não-molhante e tende a assumir um formato esférico, tal como se pode visualizar na figura 5.5.



**Figura 5.5 – Exemplo de ângulo de contacto entre a gota de água e a superfície do material sujeita a tratamento hidrófobo**

Comparando os dois materiais utilizados, constata-se que os valores referentes às amostras cerâmicas são, em geral, inferiores aos das amostras de calcário. Esta diferença é devida unicamente à natureza de cada material, uma vez que a medição do ângulo de contacto é registada no primeiro instante de contacto entre o fluido e a superfície sólida. Esta fase apenas tem em conta o espalhamento do fluido sobre a superfície e não a difusão para o seu interior ou, por outras palavras, a penetração no corpo sólido. Assim sendo, esta análise não tem em conta a capacidade de absorção do material mas sim a sua afinidade com o fluido, que se revela superior no caso do material cerâmico. Naturalmente, quanto menor a dosagem de hidrófugo aplicada, maior espalhamento do fluido se verifica, o que se traduz numa maior molhabilidade da superfície. Outro pormenor que se pode constatar ao observar-se os valores obtidos, é a existência, ainda que ligeira, de uma maior variação do ângulo de contacto no caso das amostras cerâmicas. Em termos absolutos, verifica-se um acréscimo de 55% aproximadamente do ângulo de contacto nessas amostras, ao passo que nas amostras de calcário o acréscimo é cerca de 48%. Isto significa que a aplicação do tratamento hidrófugo representa uma maior eficácia neste material.

### **5.3.2. Ensaio de absorção de água**

A realização do ensaio de absorção de água tem como objectivo, tal como o nome indica, aferir a quantidade de água absorvida pelo meio poroso. O conhecimento deste parâmetro revela-se de extrema importância, pois permite obter uma percepção da quantidade de água que é absorvida pelas partículas do meio poroso durante o processo de injeção de *grout*, o que influencia consequentemente a capacidade de injeção do *grout* (perda de fluidez), causando maior resistência à sua passagem (Jorne et al., 2014). O ensaio foi efectuado de acordo com a norma NP EN 1097-6:2003 (NP EN 1097-

6, 2003) segundo o método do picnómetro, para os diferentes meios porosos utilizados neste estudo. Após a preparação do meio poroso seco, este colocou-se no interior do picnómetro e adicionou-se água até ficar submerso. Agitou-se cuidadosamente o picnómetro para eliminar o ar ocluído, e esperou-se o tempo necessário à penetração da água nos vazios intraparticulares (saturação da amostra). No fim do período de imersão, decantou-se a maior parte da água que cobre o meio poroso e esvaziou-se o picnómetro sobre um tabuleiro, espalhando o meio poroso numa camada uniforme sobre a base do tabuleiro. Posteriormente, expôs-se o meio poroso ao ar livre de modo a evaporar a humidade superficial e remexeu-se em intervalos de tempo frequentes, assegurando assim uma secagem homogénea. Pesou-se o meio poroso saturado com superfície seca ( $m_1$ ) até atingir massa constante ( $m_2$ ), colocando-o numa estufa ventilada à temperatura de  $75 \pm 5^\circ\text{C}$ .

O parâmetro de absorção de água (em percentagem da massa seca) é calculado através da seguinte equação:

$$WA = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Em que:

WA – absorção de água (em percentagem de massa seca) [%];

$m_1$  – massa do meio poroso saturado com superfície seca ao ar [g];

$m_2$  – massa do meio poroso seco em estufa [g].

No quadro 5.2 são apresentados os valores obtidos. Apresentam-se igualmente os valores dos mesmos meios porosos sem o referido tratamento, obtidos por Jorne (Jorne et al., 2014).

**Quadro 5.2 – Capacidade de absorção de água das amostras com o tratamento de superfície aplicado**

Amostra		Absorção de água [%]			
		Sem tratamento <sup>a</sup>	Com tratamento (proporção)		
			1:6	1:4	1:2
Material cerâmico	Tipo A	19,4	11,2	8,6	5,0
	Tipo B	19,1	10,4	7,5	4,6
Material calcário	Tipo A	5,6	4,2	3,9	2,8
	Tipo B	3,9	3,1	2,7	2,1

<sup>a</sup> Resultados obtidos por Jorne (Jorne et al., 2014)

Pela análise dos resultados, é possível verificar que houve uma redução na capacidade de absorção de água quando aplicado o tratamento de superfície, quer nas amostras cerâmicas, quer nas de calcário. À medida que é aplicada maior dosagem de hidrófugo, menor capacidade tem o material de absorver a água. Ora, pode afirmar-se que estes dois conjuntos de resultados referentes a cada material parecem estar em consonância com os ângulos de contacto obtidos no goniómetro (vd. quadro 5.1), visto que maiores percentagens de absorção de água surgem associadas a menores ângulos de

contacto, e vice-versa.

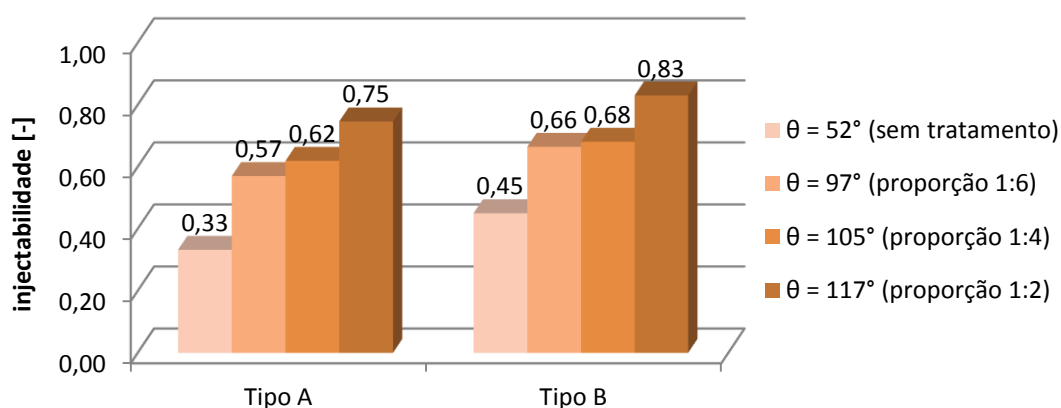
No entanto, no processo de absorção de água, os resultados alcançados sofrem variações distintas, consoante o tipo de material e o tipo de meio poroso. Devido à sua maior porosidade e tamanho dos poros relativamente ao material calcário, o material cerâmico apresenta maior capacidade de absorção de água, traduzindo-se num maior decréscimo, quer em termos relativos, quer em termos absolutos. Já no material calcário, o decréscimo dos valores de absorção de água não é tão acentuado. Isto significa que a aplicação do hidrófugo possui um maior efeito no material cerâmico, uma vez que existe uma melhor penetração do silicone na estrutura porosa que constitui esse material. Além disso, em ambos os materiais é também possível constatar uma capacidade de absorção de água ligeiramente superior no meio poroso A, do que no meio poroso B, visto que apresenta uma maior superfície específica, ou seja, existe uma maior área de superfície da parede de poros a ser envolvida por moléculas de água.

## **5.4. Avaliação da consolidação do *grout* em diferentes meios porosos**

### **5.4.1. Ensaio de injeção**

Nesta secção do presente trabalho são apresentados os resultados das injeções de *grout* nos dois tipos de meio poroso para cada material utilizado, cerâmico e calcário, onde o tratamento hidrófugo foi aplicado. O principal objectivo deste estudo consiste na avaliação do desempenho do *grout*, em termos de injectabilidade, verificando se existem melhorias da fluidez, da estabilidade e da capacidade de penetração do *grout* no meio poroso, após o tratamento aplicado. Como termo de comparação, efectuaram-se igualmente injeções de *grout* nos mesmos meios porosos de cada material mas sem a aplicação do tratamento de superfície. É relevante relembrar que nesta fase da campanha experimental utilizou-se apenas um tipo de *grout* (*grout* com 1,2% de superplastificante) em todos os meios porosos utilizados. Deste modo, garante-se a equidade do material injectado para assim se poder analisar e comparar o seu desempenho no momento da injeção entre os diferentes meios porosos estudados.

Em primeiro lugar, apresentam-se na figura 5.6 os resultados de injectabilidade do *grout* obtidos para o material cerâmico.



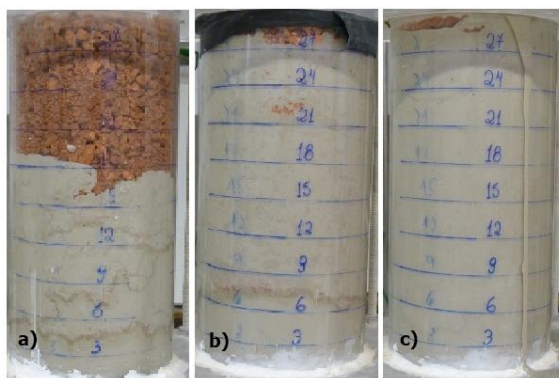
**Figura 5.6 – Amostras cerâmicas: Resultados dos ensaios de injectabilidade**

Começando pela análise do material cerâmico, verificam-se melhores resultados de injectabilidade em função do aumento do ângulo de contacto entre o *grout* e o meio poroso, quer para o tipo A, quer para o tipo B. Nas situações em que não foi aplicado qualquer tratamento, ao injectar-se o *grout* dentro do meio poroso este comporta-se como um fluido molhante, pois o ângulo de contacto entre este e a parede do poro é inferior a  $90^\circ$ . Neste caso, as forças de atracção do fluido às paredes do poro excedem as forças de coesão do próprio fluido, ou seja a tensão superficial apresenta uma resultante ascendente. Ora, analisando os valores obtidos de acordo com a equação de Washburn (vd. 2.3.4), para um ângulo de contacto baixo existe uma maior pressão de sucção capilar (no interior dos poros). Assim, o *grout* terá maior dificuldade em penetrar nos vazios existentes pois, devido à maior pressão, irá originar uma maior perda da água constituinte do *grout* para as paredes do poro, fazendo com que o escoamento diminua e, no limite, haja mesmo a sua obstrução (o que se verificou em ambos os meios porosos com  $\theta = 52^\circ$ ). É importante referir que essa pressão de sucção é tanto maior quanto menor for o tamanho do poro. Obviamente, quanto mais partículas finas possuir o meio poroso na sua constituição, maior será a área de superfície de contacto da parede de poros (superfície específica), o que resulta numa maior resistência ao fluxo de *grout*. Daí a razão para que no tipo A, que apresenta um maior número de interfaces *grout*/meio poroso comparativamente ao tipo B, se tenham obtido piores resultados de injectabilidade. Neste caso, existe uma maior perda da fluidez do *grout* resultante de uma maior perda de quantidade da água do *grout* para o meio poroso.

Contrariamente, quando é previamente introduzido o tratamento hidrófugo de superfície no meio poroso, ao injectar-se o *grout* este comporta-se como um fluido não-molhante, traduzindo um ângulo de contacto superior a  $90^\circ$  com a superfície porosa. Como se viu no quadro 5.1, o valor do ângulo de contacto aumenta consoante a proporção da dissolução de silicone aplicada. Isto significa que as forças de atracção do fluido às paredes do poro diminuem, resultando numa tensão superficial descendente (forças de coesão do fluido superiores). O valor da tensão superficial resultante descendente é progressivamente maior consoante a quantidade de silicone aplicada. Assim, a pressão de sucção capilar diminui, proporcionando ao *grout* uma maior facilidade de penetração no interior do

meio poroso (menor resistência à passagem do *grout*). Deste modo, observando novamente os resultados presentes na figura 5.6, facilmente se compreende a tendência para maiores valores de injectabilidade consoante o aumento do ângulo de contacto. Nestas situações de existência de um ângulo de contacto superior, existe um menor efeito de sucção que resulta numa menor absorção de água ou, por outro lado, uma melhor fluidez do *grout* devido a uma maior retenção de água na suspensão de *grout*.

Quando comparando ambos os meios porosos, verificam-se piores resultados de injectabilidade no meio poroso A. A razão para este facto é devido à existência de vazios de menores dimensões (poros de menor diâmetro) neste tipo de meio poroso. O *grout* tendo dificuldade de penetrar até poros mais finos, tem tendência a “procurar” novos caminhos onde consiga penetrar (poros de maior diâmetro), continuando a deixar vazios nessas zonas. Na realidade, apesar da alteração do ângulo de contacto, o *grout* continua a ser menos capaz de penetrar nos poros de menor dimensão. A vantagem de se aplicar a dissolução de silicone nesses poros, é que a pressão de sucção capilar nessas zonas é menor e, como tal, o *grout* torna-se susceptível de perder menos água. Com efeito, no meio poroso A, onde foi introduzida a menor proporção da dissolução de silicone (proporção 1:6), verifica-se um valor muito baixo de injectabilidade, revelando que para este caso em particular, o aumento do ângulo de contacto para  $97^\circ$  não foi suficiente para a obtenção de uma injeção de *grout* com sucesso. Na figura 5.7 pode constatar-se que a injeção de *grout* no meio poroso com a menor quantidade de silicone foi apenas parcial, enquanto nos restantes meios porosos (com ângulos de contacto superiores) o *grout* conseguiu aparentemente atingir o topo do cilindro, com resultados de injectabilidade segundo a ordem crescente de acordo com a proporção da dissolução de silicone aplicada, ou seja, segundo a proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ) e 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ), respectivamente.

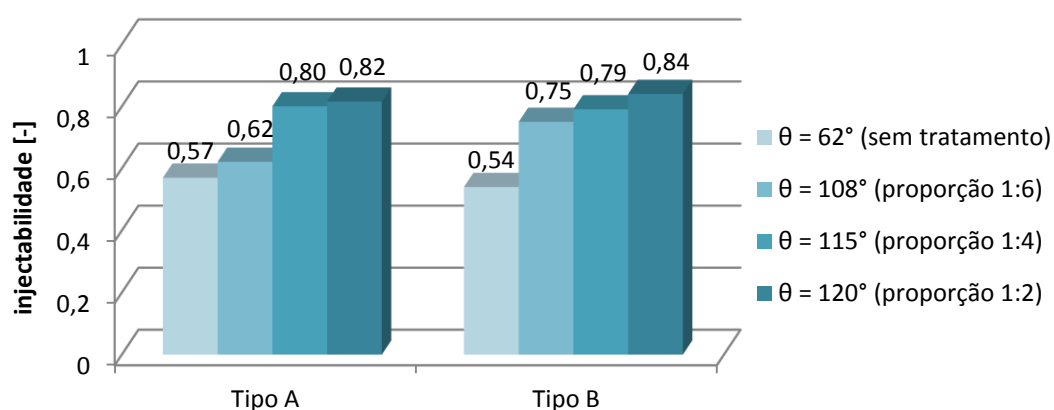


**Figura 5.7 – Alturas atingidas pelo *grout* no momento da injeção no meio poroso A composto por material cerâmico e consoante a proporção da dissolução de silicone: a) 1:6, b) 1:4 e c) 1:2**

Em relação ao meio poroso B, todas as amostras nas quais se introduziu o tratamento hidrófugo, o *grout* atingiu o topo do cilindro, não se verificando visualmente grandes diferenças entre os cilindros injectados. No entanto, os resultados de injectabilidade seguem a mesma ordem crescente

de acordo com a quantidade de silicone aplicada. Note-se, que quanto maior proporção de dissolução é aplicada no meio poroso, mais homogêneo é o resultado da injeção, ou seja o volume de vazios preenchido pelo *grout* é maior. Deste modo, pode afirmar-se que a menor sucção da água constituinte do *grout* conferida pelo aumento do ângulo de contacto leva a um melhoramento da estabilidade do *grout*, pois deixa de haver uma migração tão repentina da água por capilaridade pelo meio poroso, o que é muito importante sob o ponto de vista de uma não paragem do processo de injeção.

De seguida, apresentam-se na figura 5.8 os resultados de injectabilidade do *grout* obtidos para o material calcário.



**Figura 5.8 – Amostras de calcário: Resultados dos ensaios de injectabilidade**

Tal como nos resultados apresentados acima para as amostras cerâmicas, verifica-se uma tendência de aumento da injectabilidade das amostras de calcário sem tratamento para as amostras com tratamento, quer para o meio poroso A, quer para o meio poroso B. E, igualmente se constata que, à medida que o ângulo de contacto aumenta (consoante a proporção da dissolução de silicone) obtêm-se melhores resultados de injectabilidade. De referir que, tendo sido introduzidas as mesmas dissoluções de silicone (nas mesmas proporções) nestes meios porosos, o elemento que difere da análise anterior é o tipo de material. Tratando-se de um material, por si só, com características menos porosas (maior massa volúmica das partículas de calcário), quando comparando com o material cerâmico, naturalmente o efeito de sucção de água é menor. Nas amostras de calcário as forças de atracção do fluido às paredes do poro não apresentam uma ligação tão eficiente como as que se verificam nas amostras cerâmicas. Por outras palavras, a afinidade existente entre a pedra calcária e o *grout* é menor do que a que se verifica no material cerâmico, ou seja, o *grout* tem menor capacidade de molhar a superfície neste caso (vd. quadro 5.1). Daí os resultados de injectabilidade do *grout* nas amostras de calcário serem superiores aos obtidos nas amostras cerâmicas, para cada ângulo de contacto (com e sem tratamento aplicado), pois não é perdida tanta quantidade de água do *grout* para o meio poroso. Com efeito, para as amostras de calcário de ambos os meios porosos (tipo A e tipo B) com tratamento aplicado, o *grout* teve maior facilidade de atingir o topo do cilindro.



#### 5.4.2. Ensaio de ultra-sons Vs. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Seguidamente, apresentam-se os resultados referentes aos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral. De forma a facilitar a compreensão do texto, a análise referida será efectuada separadamente para cada material, cerâmico e calcário.

À semelhança do capítulo anterior, para uma melhor percepção do estado da injeção em função da altura do provete adoptou-se o parâmetro “Gradiente” em que para o ensaio mecânico este é apresentado nas unidades descritas, enquanto para o ensaio de ultra-sons optou-se por classificar com os símbolos (+) para positivo, (-) para negativo e (X) para um gradiente nulo ou inexistente.

##### 5.4.2.1. Amostras cerâmicas

Os resultados relativos às amostras de material cerâmico do meio poroso do tipo A (1/3G, 1/3M, 1/3F) e do tipo B (2/3G, 1/3F) encontram-se no quadro 5.3.

**Quadro 5.3 – Amostras cerâmicas: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral**

Amostra		Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
		Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
		Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
Tipo A	$\theta=52^\circ$ (Sem tratamento)	1156	X	X	1156	X	0,15	X	X	0,15	X
	$\theta=97^\circ$ (proporção 1:6)	1397	1302	X	1350	-	0,18	0,03	X	0,18	-1,97
	$\theta=105^\circ$ (proporção 1:4)	1613	1573	1012	1399	-	0,25	0,20	0,02	0,23	-1,42
	$\theta=117^\circ$ (proporção 1:2)	1654	1873	1762	1763	+	0,39	0,54	0,42	0,45	0,19
Tipo B	$\theta=52^\circ$ (Sem tratamento)	1085	756	X	921	-	0,17	0,03	X	0,17	-1,75
	$\theta=97^\circ$ (proporção 1:6)	1540	1402	1162	1368	-	0,20	0,12	0,05	0,16	-0,92
	$\theta=105^\circ$ (proporção 1:4)	1633	1682	1177	1497	-	0,22	0,22	0,08	0,22	-0,90
	$\theta=117^\circ$ (proporção 1:2)	1605	1707	1598	1637	$\equiv 0$	0,36	0,52	0,40	0,43	0,17

Analisando globalmente a influência da alteração do ângulo de contacto nas diferentes amostras segundo os dois conjuntos de resultados obtidos (ensaio de velocidade ultra-sons e ensaio de resistência à tracção por compressão diametral), pode concluir-se que, tal como observado em 5.4.1 (vd. figura 5.6), os piores resultados dão-se naquelas em que  $\theta$  é inferior a  $90^\circ$ , ou seja, onde não se aplicou qualquer tratamento. Já nas amostras em que se introduziu o tratamento hidrófugo ( $\theta > 90^\circ$ ),

observam-se resultados superiores e que aumentam progressivamente consoante maior quantidade de silicone aplicada, isto é, à medida que o ângulo de contacto aumenta. Observando os resultados de ambos os ensaios no quadro acima, é possível verificar que os valores obtidos no ensaio mecânico corroboram os valores obtidos do ensaio de ultra-sons, apresentando gradientes praticamente idênticos, quer para o tipo A, quer para o tipo B. Contudo, é possível constatar diferentes tendências entre as amostras estudadas.

Começando pela análise dos resultados das amostras em que não foi alterado o ângulo de contacto ( $\theta = 52^\circ$ ), isto é, nas quais não se aplicou qualquer tratamento, verifica-se que no meio poroso A apenas foi possível a injeção de *grout* na fatia da base. No meio poroso B existe uma diminuição acentuada dos valores de velocidades ultra-sónicas e de resistências à tracção por compressão diametral ao longo da altura do provete, traduzindo um gradiente negativo em ambos os ensaios. Note-se que em ambos os meios porosos as injeções de *grout* foram apenas parciais, tal como se viu em 5.4.1 (vd. figura 5.6). Nestes dois casos, o fenómeno de absorção da componente líquida do *grout* por parte do meio poroso resultou efectivamente num mecanismo de bloqueio que levou à obstrução do fluxo de *grout*. O facto de este material se encontrar seco e possuir elevada porosidade, leva a que o *grout* perca muita água da sua composição para o meio poroso, resultando num aumento da viscosidade e da tensão de cedência do *grout* (Jorne et al., 2015b). Assim, são alteradas as suas propriedades reológicas, tornando impossível a penetração no meio poroso.

Relativamente às amostras em que se aplicou silicone em menor quantidade, ou seja, na proporção 1:6, é possível verificar uma ligeira melhoria nos dois ensaios realizados em ambos os meios porosos. Contudo, o aumento do ângulo de contacto para  $\theta = 97^\circ$  não foi suficiente para garantir que o *grout* atingisse o topo do cilindro no momento da injeção no caso do meio poroso A. Observando os respectivos resultados dos ensaios é possível constatar que continua a existir uma tendência para uma diminuição das velocidades ultra-sónicas da fatia da base para a fatia do meio (altura máxima atingida pelo *grout* no momento da injeção). Os valores obtidos no ensaio mecânico estão em consonância com os valores do ensaio não-destrutivo, verificando-se que na última fatia que o *grout* conseguiu atingir, a do meio, a resistência à tracção por compressão diametral apresenta um valor muito baixo. No caso do meio poroso B, o *grout* conseguiu atingir o topo do cilindro, porém verifica-se igualmente uma diminuição das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura do provete. As resistências mecânicas acompanham os valores das velocidades ultra-sónicas também diminuindo, devido à menor presença de *grout* (vazios não foram preenchidos) no local mais afastado do local de entrada da injeção.

Quanto às amostras com a proporção 1:4, referentes a um  $\theta = 105^\circ$ , constata-se uma melhoria das velocidades ultra-sónicas e das resistências mecânicas nos dois meios porosos, em comparação com o caso anterior. Em ambas as amostras o *grout* atingiu o topo do cilindro, no entanto os valores das resistências à tracção por compressão diametral são muito baixos nessa zona. O que significa que apesar do *grout* ter atingido essa altura, comprovada pelos valores das velocidades ultra-sónicas, não

foi suficiente para adquirir uma resistência mecânica adequada na fatia do topo. No caso do meio poroso A, verifica-se um gradiente claramente negativo tanto das velocidades de ultra-sons como das resistências mecânicas ao longo da altura do provete, havendo uma correlação entre os valores de cada fatia entre cada ensaio. No meio poroso B, verifica-se também uma tendência de diminuição das velocidades ultra-sónicas da base para o topo da amostra, porém com uma variação ligeiramente menos acentuada. Apesar da fatia do meio apresentar valores superiores em relação à fatia da base para o ensaio ultra-sónico, para o ensaio mecânico essa diferença já não se verifica, apresentando valores iguais de resistência à tracção por compressão diametral. Contudo, sendo essa diferença muito pequena, assume-se que esteja dentro da margem de erro para este tipo de ensaio (ensaio ultra-sónico). Para este ângulo de contacto, pode afirmar-se que as resistências à tracção por compressão diametral apresentam valores aceitáveis apenas para as fatias da base e do meio em ambos os meios porosos, o que indica que até este nível houve uma razoável penetração do *grout*, sem muita perda de água para a superfície porosa.

Para um ângulo de contacto de 117°, correspondente à introdução da maior quantidade de silicone sobre o meio poroso (proporção 1:2), é possível verificar que os resultados obtidos nos dois ensaios realizados são francamente melhores em ambos os meios porosos. Ao aplicar-se esta dissolução de silicone, o *grout* consegue reter mais água na sua composição e assim melhor conservar a sua fluidez dentro do meio poroso. Contrariamente aos casos anteriores, pode considerar-se que para este ângulo de contacto os gradientes de velocidades de ultra-sons e de resistências mecânicas são positivos, o que traduz uma variação positiva das duas grandezas em função da altura do provete. Em termos de velocidades ultra-sónicas, o meio poroso A evidencia uma tendência de aumento da base para o topo do provete, mas em termos de resistências mecânicas esse aumento já apresenta uma variação menor, traduzindo um gradiente positivo, mas baixo. Quanto ao meio poroso B, é possível verificar que as velocidades ultra-sónicas apresentam uma diminuição da base para o topo. No entanto, essa diferença entre essas duas fatias é mínima, pois esses valores estão dentro da margem de erro associada a este tipo de ensaios experimentais e, como tal, assume-se como negligenciável ( $\equiv 0$ ). Já no que diz respeito aos resultados do ensaio mecânico, estes apresentam valores próximos (apesar de sofrerem um ligeiro aumento) de resistência à tracção por compressão diametral entre as fatias da base e do topo. Pode ainda verificar-se em ambos os tipos de meio poroso que a fatia do meio é a que regista valores mais elevados nos dois ensaios realizados. Importa referir que, nestes dois casos particulares, a injeção de *grout* foi praticamente homogénea ao longo da altura da amostra, que se comprova com estes valores elevados nestes dois ensaios realizados. Portanto, este conjunto de valores correspondente a um ângulo de contacto de 117°, dá a entender que existiu um preenchimento considerável dos vazios do meio poroso aquando do momento da injeção e que, após o processo de cura, resultou numa boa ligação mecânica entre o *grout* injectado e o meio poroso.

#### 5.4.2.2. Amostras de calcário

Seguidamente, apresentam-se no quadro 5.4, os resultados relativos às amostras de calcário do meio poroso do tipo A (1/3G, 1/3M, 1/3F) e do tipo B (2/3G, 1/3G).

**Quadro 5.4 – Amostras de calcário: Resultados dos ensaios de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral**

Amostra		Velocidade de ultra-sons [m/s]					Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]				
		Localização da fatia			Média	Gradiente	Localização da fatia			Média	Gradiente [MPa/m]
		Base	Meio	Topo			Base	Meio	Topo		
Tipo A	$\theta=62^\circ$ (Sem tratamento)	1254	987	X	1121	-	0,20	0,08	X	0,14	-1,50
	$\theta=108^\circ$ (proporção 1:6)	1311	1431	1180	1307	-	0,17	0,19	0,05	0,18	-0,72
	$\theta=115^\circ$ (proporção 1:4)	1556	1710	1363	1543	-	0,22	0,26	0,14	0,21	-0,51
	$\theta=120^\circ$ (proporção 1:2)	1634	1799	1406	1613	-	0,19	0,22	0,13	0,18	-0,37
Tipo B	$\theta=62^\circ$ (Sem tratamento)	1350	1079	X	1215	-	0,18	0,12	X	0,15	-0,75
	$\theta=108^\circ$ (proporção 1:6)	1427	1623	1254	1434	-	0,17	0,24	0,11	0,17	-0,36
	$\theta=115^\circ$ (proporção 1:4)	1564	1732	1442	1579	-	0,21	0,25	0,14	0,20	-0,42
	$\theta=120^\circ$ (proporção 1:2)	1788	1858	1473	1706	-	0,22	0,34	0,15	0,24	-0,43

Analisando de uma forma global as diferentes amostras de calcário tendo por base a alteração do ângulo de contacto, observam-se, tal como nas amostras de material cerâmico e em concordância com os resultados de injectabilidade apresentados em 5.4.1 (vd. figura 5.8), piores resultados nas amostras com um  $\theta$  inferior a  $90^\circ$ , e melhores resultados no conjunto de amostras com um  $\theta$  superior a  $90^\circ$ , isto é, nas amostras em que se aplicou previamente o tratamento hidrófugo. Nestas últimas amostras referidas obtêm-se em geral melhores resultados à medida que o ângulo de contacto aumenta. Também facilmente se verifica que os resultados do ensaio de velocidade de ultra-sons corroboram os resultados do ensaio mecânico, evidenciando a existência de gradientes negativos ao longo da altura do provete em todas as amostras. De relembrar que as amostras sem tratamento servem apenas como termo de comparação para aquelas em que se introduziu o tratamento de superfície e nas quais se alterou o ângulo de contacto.

Relativamente às amostras em que não se alterou o ângulo de contacto, isto é, para  $\theta = 62^\circ$ , já era expectável que os dois meios porosos (tipo A e tipo B) apresentassem valores mais baixos no ensaio de velocidade de ultra-sons comparativamente ao conjunto de amostras em que se alterou o ângulo de contacto. Igualmente era de esperar que o meio poroso A apresentasse velocidades ultra-sónicas inferiores às obtidas no meio poroso B, uma vez que em teoria possui um maior número de interfaces *grout*/meio poroso, ou seja, mais superfície de parede de poro em contacto com o *grout*, o que origina mais quantidade de água absorvida pelos poros. Nestas duas amostras sem tratamento, os respectivos resultados do ensaio de ultra-sons apresentam uma variação negativa da base para o meio

do provete (altura máxima atingida pelo *grout* durante o ensaio de injeção), sendo menos negativa para o meio poroso B. Os valores das resistências à tracção por compressão diametral estão em consonância com os valores das velocidades ultra-sónicas para cada meio poroso, apresentando uma variação negativa em função da altura do provete. Assim, os dois conjuntos de resultados obtidos de cada ensaio reflectem a maior existência de vazios em altura, traduzindo a fraca compacidade das amostras, especialmente na última fatia, a do meio. Devido à natureza da pedra calcária, a adesividade das partículas de ligante na referida zona de interface é reduzida, o que pode explicar as baixas resistências mecânicas.

Quanto às amostras em que se aplicou a menor quantidade de silicone (proporção 1:6), isto é, aquelas que passaram a ter um ângulo de contacto de  $108^\circ$ , é possível observar através dos resultados dos dois ensaios que o *grout* conseguiu atingir o topo do cilindro, tanto no meio poroso A como no meio poroso B. No entanto, os valores referentes às fatias do topo de ambos os meios porosos não são suficientes para se obter uma resistência mecânica razoável. Estes valores estão de acordo com as velocidades ultra-sónicas que também apresentam valores baixos a este nível. Já a fatia do meio, é a que apresenta maiores valores, quer de velocidades ultra-sónicas, quer de resistências mecânicas, apesar dos gradientes reflectirem um pior comportamento em altura em ambas as amostras com este ângulo de contacto. Comparando os dois tipos de meio poroso, verifica-se que o tipo A é o que apresenta valores mais baixos e com uma variação mais acentuada de resistência mecânica, traduzindo um gradiente mais negativo, o que é expectável dada a sua granulometria.

Para um ângulo de contacto de  $115^\circ$  verificam-se tendências semelhantes ao caso anterior em ambos os meios porosos, isto é, uma diminuição das velocidades ultra-sónicas e das resistências mecânicas da base para o topo, sendo a fatia do meio aquela que apresenta o valor mais elevado. Como esperado, ao aumentar-se a quantidade de silicone na dissolução para uma proporção 1:4 sobre o meio poroso obtêm-se melhores injectabilidades, que se traduzem em velocidades ultra-sónicas mais elevadas comparativamente ao caso anterior (proporção 1:6), sendo mais notória a melhoria para o meio poroso A. Entre os dois tipos de meio poroso com a mesma dosagem aplicada (proporção 1:4), verifica-se um conjunto de valores muito aproximado nos dois ensaios realizados, o que indica que neste caso o *grout* obteve um desempenho semelhante, e que está também de acordo com os resultados registados no ensaio de injectabilidade (vd. figura 5.8).

Por último, relativamente às amostras com o ângulo de contacto mais elevado ( $\theta = 120^\circ$ ), as quais o tratamento de superfície foi aplicado em maior quantidade, é possível verificar que continua a existir a tendência de diminuição das velocidades ultra-sónicas da base para o topo em ambos os meios porosos. Além disso, mais uma vez constata-se velocidades superiores na fatia do meio em ambos os casos. Aplicando esta dissolução de silicone na proporção 1:2 é visível a melhoria dos resultados para o ensaio de ultra-sons comparativamente à proporção 1:4, mas em relação ao ensaio mecânico verifica-se uma particularidade no meio poroso A. Neste caso, as resistências à tracção por compressão diametral são superiores para a proporção 1:4 e não para a proporção 1:2, em todas as

fatias. Pode haver uma possível explicação para tal ocorrência. Apesar do *grout* ter maior facilidade de penetração dentro do meio poroso devido a um ângulo de contacto superior (traduzidas pelos valores das velocidades ultra-sónicas), por outro lado poderá existir uma menor afinidade entre a superfície porosa e o *grout*, causada pela fraca adesividade das partículas de ligante às paredes dos poros (superfície mais apolar). Nestas zonas de interface ocorre um fenómeno químico interessante, no qual não existe libertação de iões da superfície porosa susceptíveis de combinar com os iões derivados da hidratação do *grout* (Jorne et al., 2015b). Como tal, existe apenas uma simples deposição das partículas de ligante sobre a superfície, o que proporciona menores resistências mecânicas. Contudo, os valores das resistências mecânicas estão em consonância com os valores das velocidades ultra-sónicas, diminuindo da base para o topo do cilindro. No caso do meio poroso B, as resistências à tracção por compressão diametral das fatias apresentam a mesma tendência (de diminuição, como nas velocidades ultra-sónicas) que o meio poroso A, mas são também aquelas que registam os maiores valores comparativamente à proporção 1:4.

#### **5.4.2.3. Comparação entre as amostras cerâmicas e as amostras de calcário**

O objectivo nesta fase é comparar as amostras constituídas pelos dois materiais, cerâmico e calcário, para cada tipo de meio poroso. Apesar dos ângulos de contacto serem diferentes para a respectiva dissolução de silicone, devido às características intrínsecas de cada material, a análise de comparação entre os dois materiais considera-se igualmente correcta. As dosagens de água e silicone foram aplicadas em igual quantidade para cada material de modo a garantir a sua equidade. Assim sendo, para uma melhor compreensão de texto, a análise dos resultados obtidos nos ensaios de velocidade de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral dos dois materiais é efectuada em termos das diferentes proporções da dissolução de silicone e não em termos de ângulos de contacto.

A comparação dos resultados obtidos pelos dois ensaios realizados entre os dois materiais para cada meio poroso é de difícil análise, uma vez que não existem diferenças significativas entre as amostras cerâmicas e as de calcário se estas forem analisadas detalhadamente, fatia a fatia. Contudo, é possível retirar algumas conclusões interessantes considerando de um modo geral a mudança de comportamento do conjunto *grout*/meio poroso face à alteração da superfície do material de suporte.

Nos casos em que não foi aplicado qualquer tratamento, é possível verificar nos dois tipos de meio poroso que as amostras de calcário apresentam velocidades ultra-sónicas superiores em todas as fatias. Ao introduzir-se a dissolução de silicone nos dois conjuntos de amostras, o mesmo não se pode afirmar em relação à totalidade das fatias. Contudo, em termos de valores médios as amostras de calcário continuam a registar velocidades ultra-sónicas superiores praticamente em todas as amostras. Ainda assim, no meio poroso A com a proporção 1:2 parece verificar-se o oposto. Neste caso, a

amostra cerâmica é a que apresenta velocidades ultra-sónicas superiores. O facto de o material cerâmico possuir uma maior porosidade, comprovada também pelo ensaio de absorção de água realizado (vd. quadro 5.2), seria expectável que resultasse em piores resultados no ensaio de ultra-sons, comparativamente ao material calcário. No entanto, esta proporção de água:silicone utilizada reflecte uma elevada eficácia neste tipo de meio poroso, indiciando uma maior homogeneidade de injeção em altura, fruto de um menor efeito de sucção por parte das partículas cerâmicas. O gradiente positivo das velocidades ultra-sónicas registado nesta amostra (único caso) vem confirmar o melhor comportamento do *grout* em altura. Nos restantes casos, a referida acção de sucção nas amostras cerâmicas é superior do que nas de calcário, o que pode explicar a diferença de volume de vazios preenchido pelo *grout* entre os dois materiais, que se reflecte em piores resultados de ultra-sons. Outro pormenor que é possível constatar, diz respeito à comparação das velocidades ultra-sónicas (dos dois conjuntos de amostras) referentes à zona mais afastada do ponto de injeção, isto é, à última fatia atingida pelo *grout*. À excepção das amostras onde se aplicou maior quantidade de silicone (proporção 1:2), as maiores velocidades registadas nas amostras de calcário nessa zona, assim como os respectivos gradientes menos negativos (que significam uma menor variação das velocidades ultra-sónicas em altura) comprovam uma vez mais a maior difusão do *grout*, e indiciam um estado mais compacto nas amostras constituídas por este material.

Importa lembrar que, embora ambos os ensaios tenham o mesmo objectivo, analisam-no de maneiras diferentes. O ensaio de ultra-sons depende principalmente do grau de compacidade do material (a velocidade de propagação de ultra-sons é tanto maior quanto mais denso for o conjunto *grout*/meio poroso), ao passo que o ensaio de tracção por compressão diametral também depende das ligações que se estabelecem entre o *grout* e o meio poroso (Guerreiro, 2014). No caso das amostras cerâmicas, devido a uma maior porosidade, a adesividade das partículas de ligante às partículas do meio poroso é superior, enquanto nas amostras de calcário a ligação é estabelecida apenas por simples deposição das partículas de ligante. Ora, em teoria deveriam então obter-se valores superiores de resistência mecânica nas amostras cerâmicas. No entanto, o volume de *grout* injectado (entenda-se injectabilidade) representa um papel preponderante nas resistências mecânicas das amostras, pelo que observando as amostras com menores dosagens de silicone (isto é, até às amostras com a dissolução de silicone na proporção 1:4) onde as injectabilidades foram menores, verificam-se menores valores resistência à tracção por compressão diametral no caso das amostras cerâmicas.

No caso das amostras com a maior dosagem de silicone (proporção 1:2), o facto de existir uma camada com mais propriedades de hidro-repelência, seria expectável uma ligação mecânica mais fraca na zona de contacto do *grout* às partículas do meio poroso, traduzida por menores resistências mecânicas das respectivas amostras. No entanto, verifica-se que as maiores dosagens de silicone surgem associadas a maiores injectabilidades, o que pode explicar mais uma vez os valores mais elevados de resistência à tracção por compressão diametral. Pode então concluir-se que para os meios porosos injectados e as dosagens de silicone utilizadas, o volume de *grout* injectado no espaço

interparticular prevalece sobre a ligação que existe na interface *grout*/meio poroso.

Importa também referir, que os gradientes negativos apresentados pelas resistências mecânicas podem provavelmente dever-se à ocorrência de fenómenos de sedimentação gravitacional das partículas sólidas do *grout* ao longo da altura de injeção. As forças gravitacionais que actuam sobre as partículas de ligante são superiores às forças electrostáticas e às forças de Van-der-Waal's, responsáveis por manter as partículas em suspensão (Jorne et al., 2015a). Assim, ao cessar o processo de injeção as partículas tendem a depositar-se na direcção da base da estrutura de suporte (fundo do provete), resultando numa diminuição da resistência à tracção por compressão diametral nas zonas mais afastadas do local da injeção (menor quantidade de ligante).

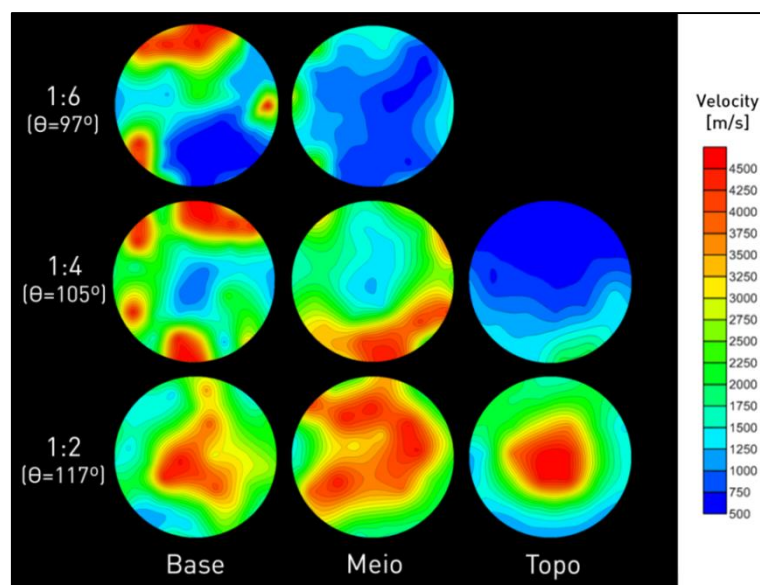
### **5.4.3. Tomogramas ultra-sónicos**

Nesta secção apresentam-se então os tomogramas ultra-sónicos obtidos segundo o processo anteriormente descrito no capítulo 3 (vd. 3.2.3.3). Os resultados obtidos apresentam-se consoante o parâmetro em estudo, a variação do ângulo de contacto de acordo com a introdução de diferentes proporções da dissolução de silicone sobre o meio poroso. Com efeito, inicia-se a análise dos tomogramas das secções horizontais referentes a cada uma das fatias (base, meio e topo) reunidos numa só imagem, seguida da comparação dos mesmos com as respectivas fotografias. Devido à vasta quantidade de resultados apresentam-se apenas neste capítulo as imagens mais reveladoras. Para uma melhor compreensão de texto, à semelhança do que tem vindo a ser feito neste capítulo, a sua exposição será efectuada em primeiro lugar de acordo com cada material, cerâmico e calcário, e posteriormente a comparação dos dois materiais.

#### **5.4.3.1. Amostras cerâmicas**

Começando pela análise das amostras cerâmicas, os tomogramas representativos do meio poroso A encontram-se na figura 5.9.





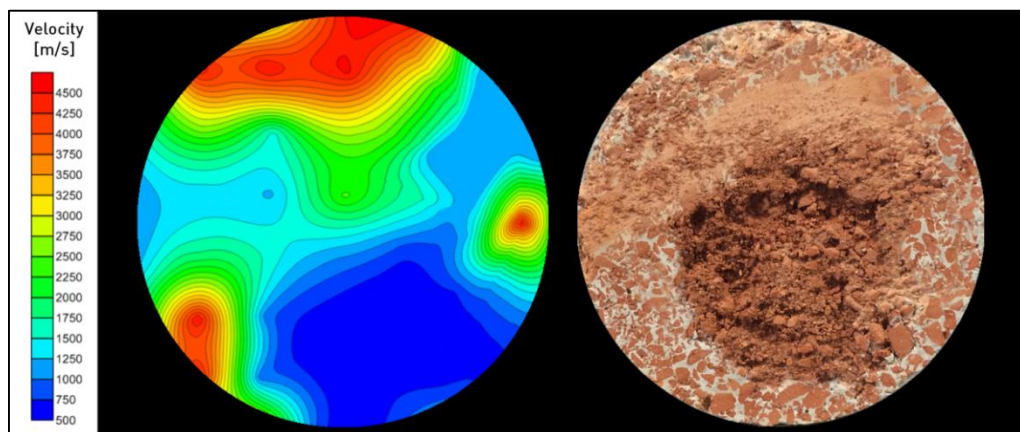
**Figura 5.9 – Amostras cerâmicas; Tipo A: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone**

Como é possível verificar, consoante a proporção da dissolução de silicone aplicada, evidenciam-se tendências opostas de variação da velocidade de ultra-sons ao longo da altura do provete, sendo mais perceptíveis numa amostra do que noutras. Tais tendências estão de acordo com o já referido em 5.4.2.1, onde se verificou uma variação negativa das velocidades ultra-sónicas em função da altura nas amostras que apresentam um ângulo de contacto de 97° e 105°, que correspondem a dissoluções de silicone nas proporções 1:6 e 1:4, respectivamente, e positiva na amostra com maior ângulo de contacto, ou seja, na que possui a proporção 1:2. Comparando a evolução das velocidades segundo os tomogramas e o gradiente das resistências à tracção por compressão diametral (vd. quadro 5.3) é possível constatar que existe uma certa coerência entre os dois conjuntos de resultados, na medida em que ambos apresentam semelhantes tendências em função da altura do provete.

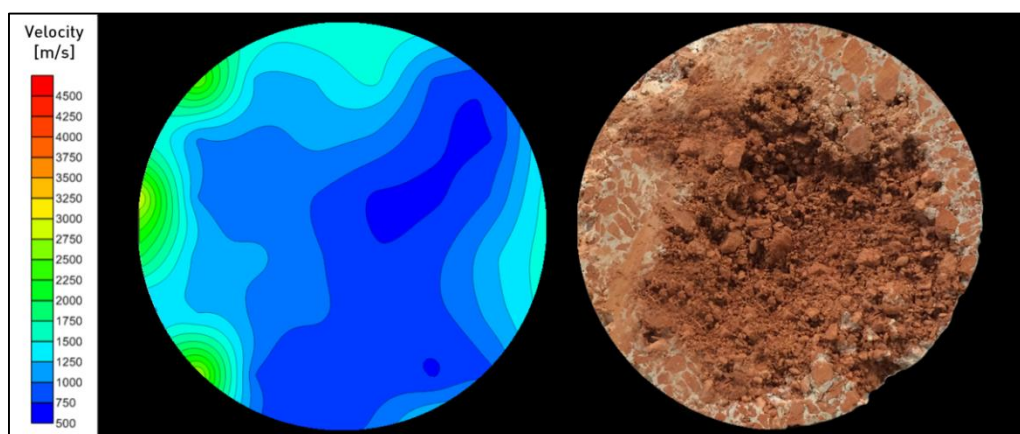
Observando as imagens tomográficas na figura 5.9, verifica-se claramente que as fatias respeitantes à amostra com a menor quantidade de silicone (proporção 1:6), pertencente a um  $\theta = 97^\circ$ , apresentam os piores resultados, traduzidos pela maior presença de cor azul escura, sobretudo na última fatia, a do meio. Esta cor corresponde aos valores mais baixos de velocidade de ultra-sons (inferiores a 1200 m/s) que, neste caso, denunciam a ocorrência de fenómenos de bloqueio do meio poroso à passagem de *grout*. Para além da maior porosidade (característica das partículas cerâmicas) e da reduzida dimensão dos poros (conferida pela granulometria deste tipo de meio poroso), o facto de não se ter tornado a superfície tão apolar, contribuiu para um maior efeito de sucção por parte do meio poroso que efectivamente levou à obstrução do *grout* aquando da injeção.

Nas figuras 5.10 e 5.11, é possível observar com maior detalhe, através dos tomogramas e respectivas fotografias dessas duas fatias, a maior dificuldade de penetração do *grout* pela zona interior do provete. Importa salientar a elevada semelhança entre a imagem tomográfica e a imagem

real do plano superior das duas fatias, onde surgem os vazios associados a cores azuladas e as zonas de maior compacidade a cores avermelhadas (estas últimas, correspondentes a velocidades ultra-sónicas acima de 3500 m/s).

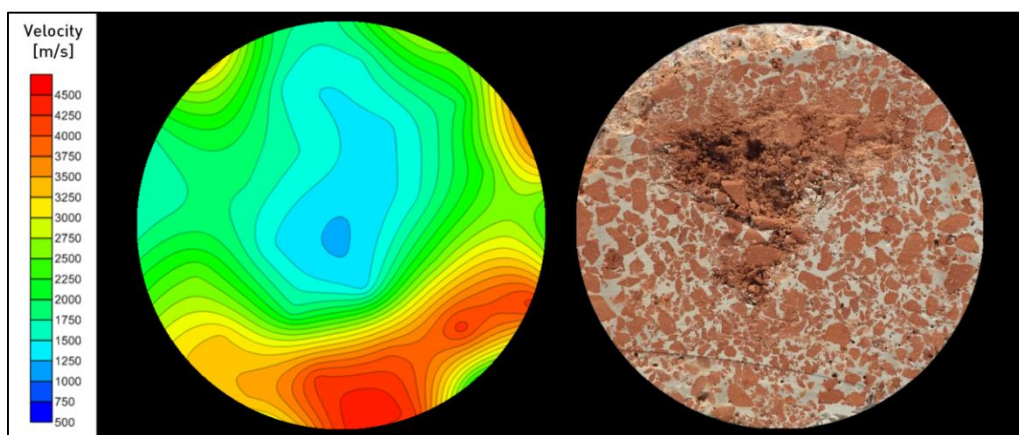


**Figura 5.10 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base**



**Figura 5.11 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**

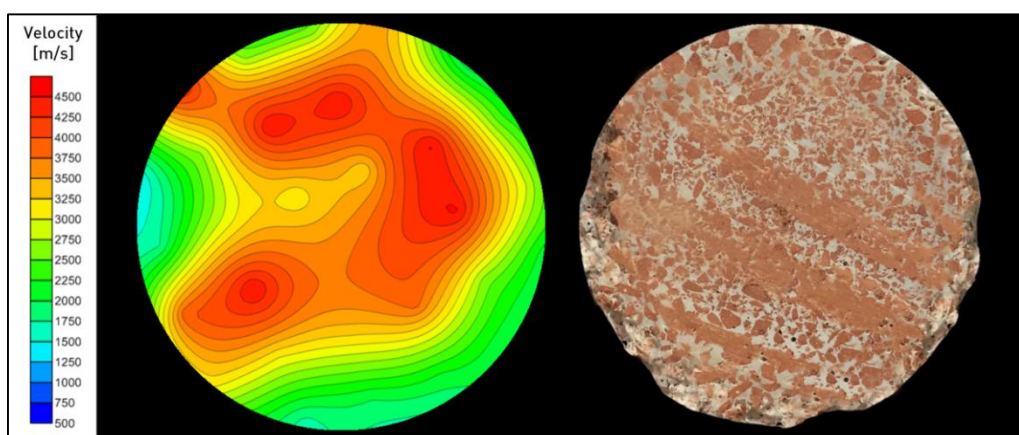
Quanto à amostra com a proporção 1:4, o aumento do ângulo de contacto para  $105^\circ$  denota uma melhoria de resultados das duas primeiras fatias (base e meio) em relação ao caso da amostra anterior, cujos respectivos tomogramas apresentam zonas mais esverdeadas e algumas avermelhadas, correspondentes a velocidades ultra-sónicas acima de 1500 m/s e 3500 m/s, respectivamente. No que respeita à fatia do meio, quando comparando entre esta amostra e a amostra apresentada acima (com a proporção 1:6), verificam-se grandes melhorias no grau de compacidade. Esta evidência pode ser comprovada através da figura 5.12, na qual se apresenta o tomograma e a respectiva fotografia da fatia do meio, referente à amostra com a proporção 1:4. Já fatia do topo, é claramente aquela que apresenta velocidades ultra-sónicas mais baixas, com elevada presença de cor azul escura, traduzindo o gradiente negativo registado em 5.4.2.1.



**Figura 5.12 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**

Em relação às fatias referentes à amostra com a proporção 1:2, que representam o maior ângulo de contacto ( $\theta = 117^\circ$ ), são as que registam os melhores resultados, comparativamente às restantes amostras. Os respectivos tomogramas apresentam uma maior presença de cor vermelha em todas as fatias, reforçando uma vez mais a análise efectuada aquando do ensaio de ultra-sons. Note-se ainda que a fatia do meio parece ser aquela em que se obtêm velocidades ultra-sónicas superiores, o que denuncia uma maior compacidade nessa zona do provete.

Na figura 5.13 é efectivamente possível de observar-se o estado mais compacto da fatia do meio, que se comprova não só pelo tomograma mas também pela fotografia respectiva.

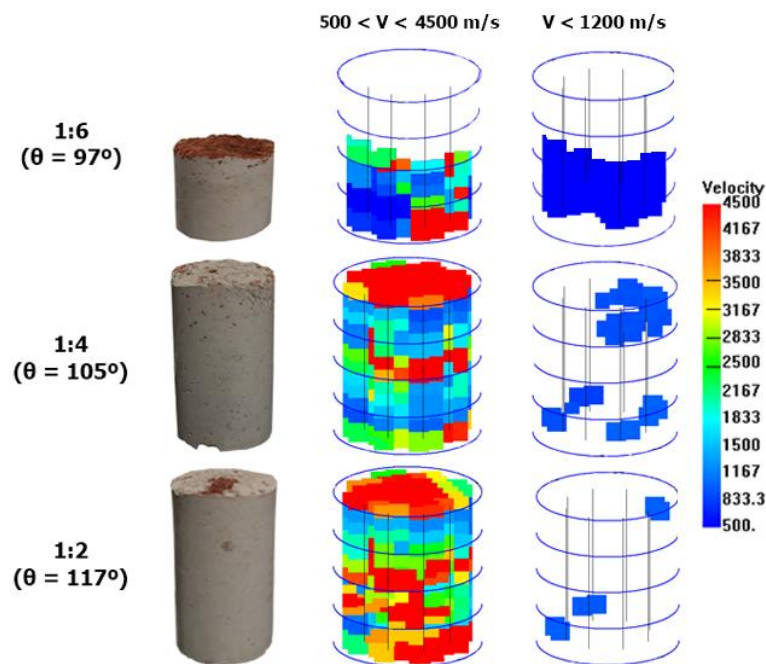


**Figura 5.13 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**

Em suma, pode afirmar-se que o aumento do ângulo de contacto neste tipo de meio poroso (tipo A) composto por material cerâmico revela uma considerável eficácia, principalmente no caso em que é aplicada maior quantidade de silicone, ou seja com a introdução da dissolução de silicone na proporção 1:2. Neste caso, os tomogramas espelham uma adequada difusão do *grout* aquando da

injecção, dando origem a uma maior compacidade do meio em todas as fatias do provete. Nos restantes casos, as amostras com as proporções 1:4 e 1:6, devido à menor quantidade silicone aplicada, logicamente apresentaram resultados mais fracos, apesar de seguirem uma ordem de acordo com o expectável.

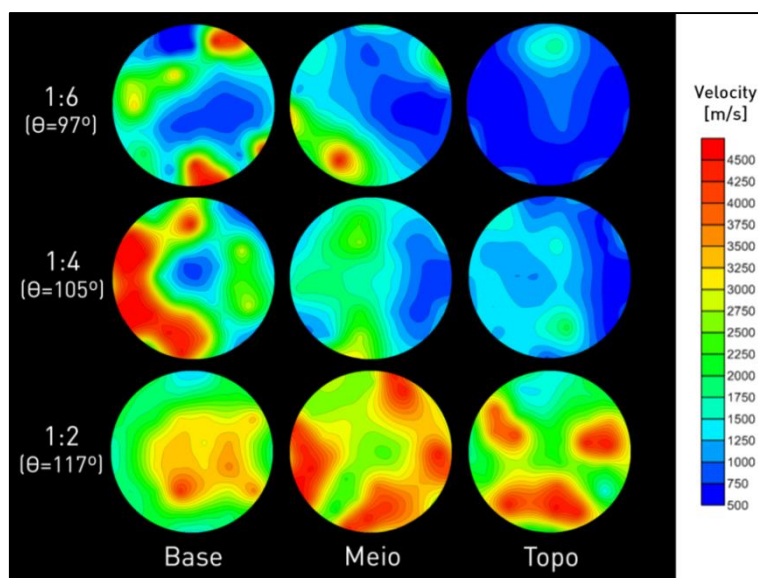
Devido à existência de uma diferença significativa de injectabilidades neste conjunto de três amostras (também observada logo após a injecção, na figura 5.7), esta primeira análise efectuada pode, de resto, ser comprovada através da figura 5.14, na qual se apresentam as fotografias e os respectivos tomogramas 3D dos provetes inteiros de cada amostra. Adicionalmente, apresentam-se os tomogramas 3D referentes a velocidades inferiores a 1200 m/s (preenchidas a azul escuro). Este tipo de tomograma permite perceber com maior precisão a localização e a dimensão dos vazios causados pela ausência de *grout* no momento da injecção, que posteriormente acabam por comprometer a resistência mecânica do provete.



**Figura 5.14 – Amostras cerâmicas; Tipo A: Fotografia (esq.) e tomogramas 3D (dir.) das amostras consoante a proporção da dissolução de silicone**

De seguida, apresentam-se na figura 5.15 os tomogramas representativos do meio poroso B, também composto por material cerâmico e com o mesmo tratamento de superfície aplicado.

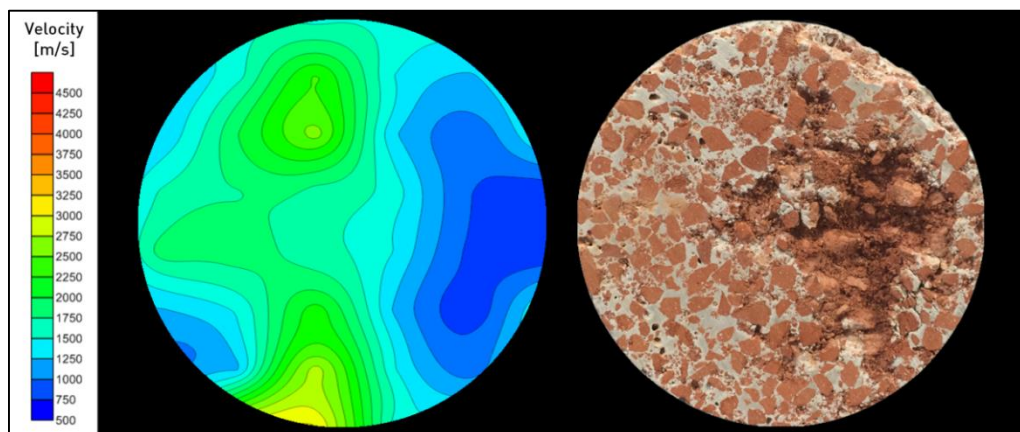




**Figura 5.15 – Amostras cerâmicas; Tipo B: Tomogramas ultra-sônicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone**

Numa primeira observação dos tomogramas referentes ao meio poroso B, destaca-se uma tendência de variação negativa das velocidades ultra-sônicas nas amostras (em função da sua altura) que apresentam um ângulo de contacto de  $97^\circ$  e  $105^\circ$ , ou seja, nas quais se introduziu a dissolução de silicone com as proporções 1:6 e 1:4, respectivamente. Tal como na análise efectuada anteriormente para o conjunto de amostras do meio poroso A, é possível verificar uma diminuição das velocidades ultra-sônicas em função da altura do provete nestas duas amostras, traduzida pela presença de maior quantidade de cor azul escura à medida que a distância do local de entrada de injeção aumenta. No entanto, na amostra com  $\theta = 105^\circ$ , seria expectável que a fatia do meio apresentasse zonas com cores avermelhadas ou pelo menos zonas com menor quantidade de cor azul, pois é a fatia cujo ensaio de ultra-sons registou o maior valor (vd. quadro 5.3). Além disso, no ensaio mecânico foi também a que apresentou maiores valores de resistência à tracção por compressão diametral, à semelhança da fatia da base. Porém, ao observar-se em pormenor o tomograma e a respectiva fotografia dessa fatia na figura 5.16, pode constatar-se que, neste caso particular, a técnica de tomografia ultra-sónica parece apresentar um maior grau de fiabilidade comparativamente ao ensaio de ultra-sons efectuado anteriormente, uma vez que a zona menos compacta da fatia coincide com a zona preenchida a azul escuro, o que transmite uma semelhança elevada entre as duas imagens (tomográfica e fotográfica). Além disso, salienta-se que em meios heterogéneos (como é o caso dos meios porosos em estudo) e com um número de interfaces considerável existe uma atenuação acústica superior, que é tanto maior quanto menor for a densidade dos mesmos [(Coelho, 2013), (Jorne et al., 2014)]. Ora, em situações da existência de vazios de grande dimensão, tal como o exemplo que se apresenta na fatia da amostra cerâmica na figura 5.16, a atenuação acústica é muito elevada. Deste modo, a utilização da tomografia ultra-sónica na detecção de vazios e/ou descontinuidades no interior das amostras injectadas com

*grout* revela-se uma técnica de análise não-destrutiva mais fiável e valiosa que o ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, na medida em que se obtém uma resolução de qualidade dos resultados das amostras em toda a sua extensão e não apenas em termos de valores médios.



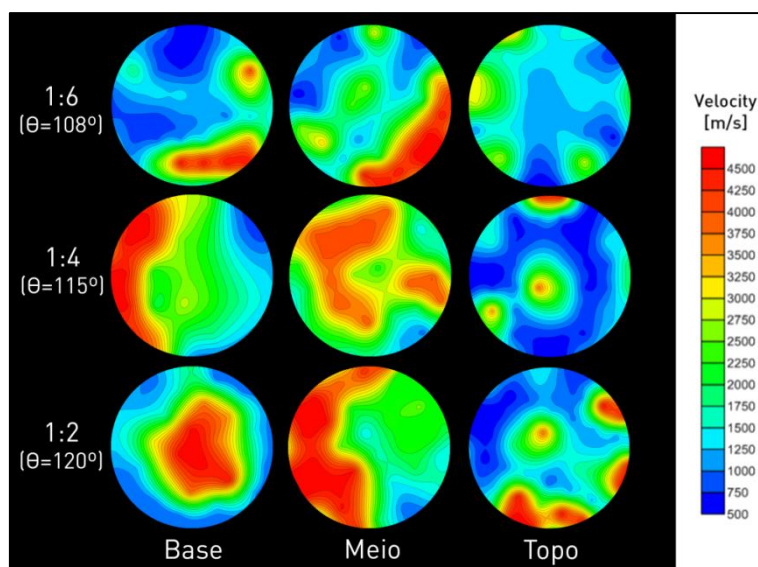
**Figura 5.16 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**

Em relação à amostra que apresenta um  $\theta = 117^\circ$ , isto é, a amostra que possui a proporção 1:2, não existe uma tendência bem definida de variação das velocidades ultra-sónicas, principalmente entre as fatias da base e a do topo, uma vez que não é perceptível uma grande diferença de cores entre as mesmas. As respectivas velocidades ultra-sónicas comprovam esta dificuldade de identificar qual dessas duas fatias apresenta melhores resultados, pois registam valores muito próximos no ensaio de ultra-sons (vd. quadro 5.3). Já a fatia do meio parece ser a que apresenta maiores velocidades ultra-sónicas, que se verificam através da maior presença de cor vermelha comparativamente às restantes fatias.

Analogamente ao meio poroso A (vd. figura 5.9), pode afirmar-se que nos tomogramas 2D referentes às amostras do meio poroso B, as maiores velocidades ultra-sónicas registadas foram obtidas nas amostras com a proporção 1:2, com melhores resultados em todas as fatias, seguidas das amostras com 1:4 e, por último, das amostras com 1:6. O aumento do ângulo de contacto neste material revela-se uma vez mais influente na melhoria dos resultados de injectabilidade, na medida em que promove uma maior homogeneidade da injeção de *grout* e, conseqüentemente, uma maior compacidade do meio. Pode ainda dizer-se que nas zonas de maior proximidade do local de entrada da injeção, a melhor fluidez do *grout* permite-lhe uma melhor penetração nos vazios do meio poroso, que origina posteriormente melhores resistências mecânicas. Note-se que semelhantes hierarquias de velocidades ultra-sónicas e de resistências mecânicas já tinham, de resto, sido verificadas em 5.4.2.1, de modo que os tomogramas corroboram as conclusões anteriormente retiradas.

#### 5.4.3.2. Amostras de calcário

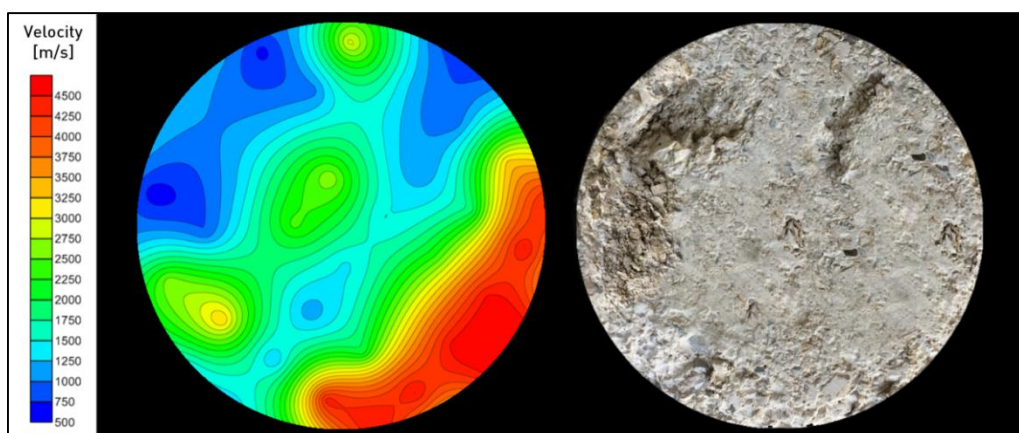
Passando agora à análise das amostras de calcário, os tomogramas representativos do meio poroso A encontram-se na figura 5.17.



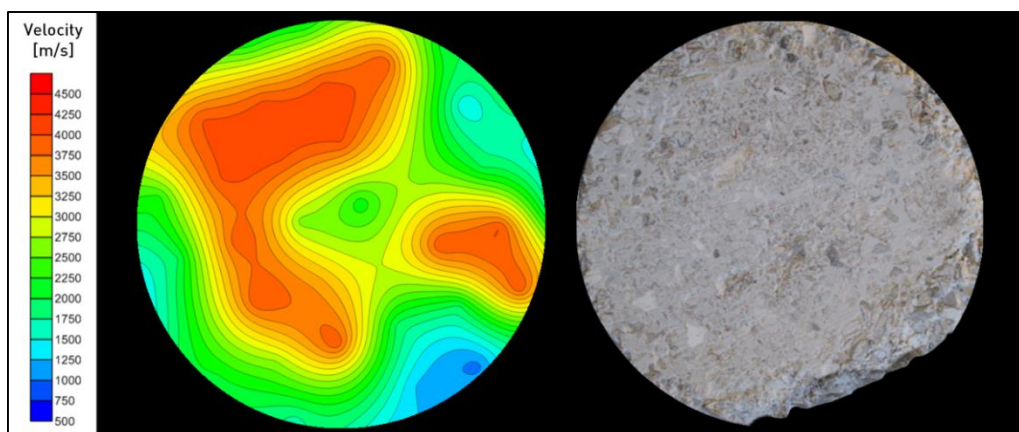
**Figura 5.17 – Amostras de calcário; Tipo A: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone**

Observando os tomogramas referentes ao meio poroso A, verifica-se de um modo geral a existência de uma tendência de evolução negativa das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura do provete em todas as amostras, sendo mais notória essa variação entre a fatia da base e a fatia do topo. Centrando a análise apenas a essas duas fatias referidas, é possível verificar uma maior presença de áreas preenchidas a vermelho na fatia da base em todas as amostras, que traduzem velocidades ultra-sónicas acima de 3500 m/s, aproximadamente. Na zona mais distante do local de entrada de injeção, isto é, na fatia do topo, a presença da cor vermelha é menor em detrimento da cor azul, esta última correspondente a velocidades até 1500 m/s, o que indicia uma maior existência de vazios. Já no que diz respeito à fatia do meio, esta parece ser aquela que apresenta melhores resultados, pela maior presença de cor vermelha e menor presença de cor azul em todas as amostras, o que significa uma maior compacidade do meio nesta zona. Além disso, durante a realização do ensaio mecânico sobre esta fatia, verificou-se igualmente um valor de resistência à tracção por compressão diametral superior em todo este conjunto de amostras. A esta altura do provete, a qualidade das ligações criadas entre o *grout* e o meio poroso é superior, possivelmente devido a uma relação água/ligante óptima na composição do *grout*, que se revela como um factor determinante para a resistência à tracção por compressão diametral. Obviamente, o grau de compacidade dessa fatia varia consoante a amostra, sendo possível visualizar-se uma maior diferença da amostra com a proporção 1:6 para as outras duas amostras. Na verdade, entre estas duas últimas, referentes às amostras com as proporções 1:4 e 1:2, não se verificam grandes diferenças a esta altura do provete. Através das figuras 5.18, 5.19 e 5.20 é

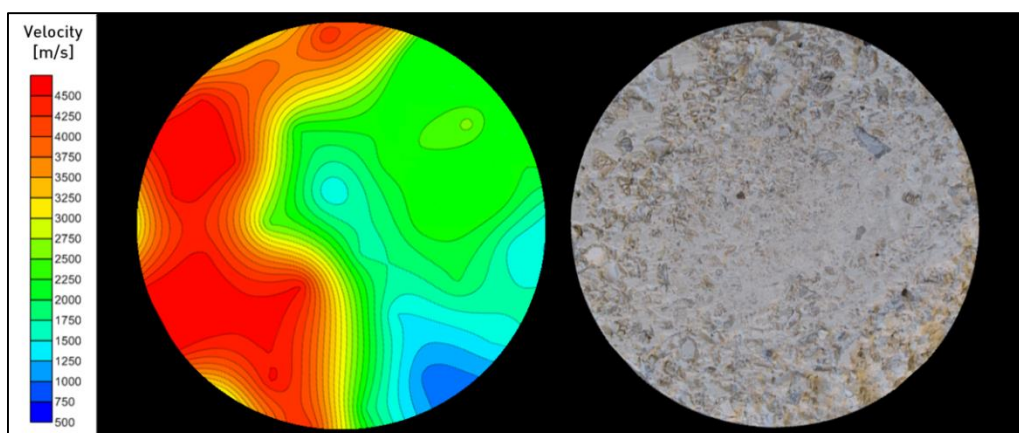
possível visualizar com maior precisão essa evidência entre as três fatias do meio, não só pelo tomograma representativo da fatia referida mas também pela imagem real correspondente.



**Figura 5.18 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**



**Figura 5.19 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**

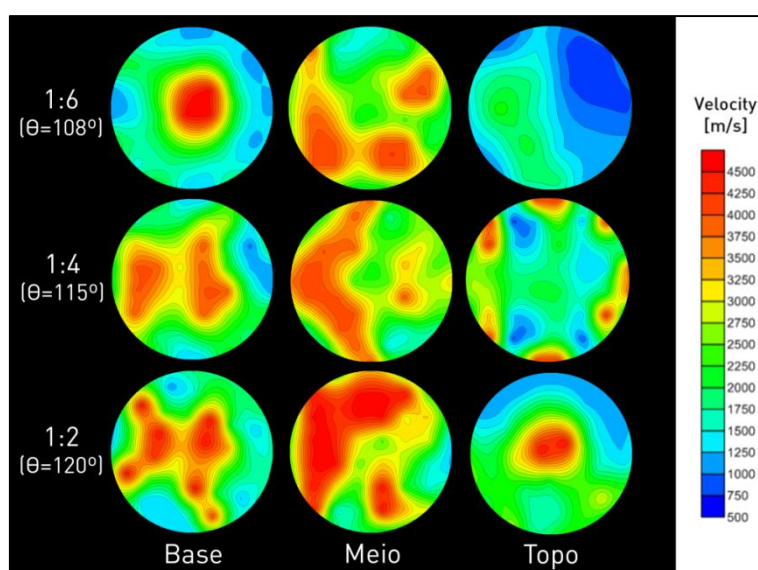


**Figura 5.20 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio**



Fazendo uma análise comparativa aos tomogramas relativos às três amostras estudadas, pode afirmar-se que a amostra na qual se introduziu a menor quantidade de silicone (proporção 1:6) é naturalmente aquela que apresenta os piores resultados, visto que foi a que ficou menos hidrofugada (menos apolar), correspondente a um  $\theta = 108^\circ$ . Entre as restantes amostras, nomeadamente as que possuem as proporções 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ) e 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ), ao observar-se os respectivos tomogramas, a diferença entre elas não é tão perceptível apesar do ensaio de ultra-sons registar melhores resultados nesta última (vd. quadro 5.4).

Em seguida, apresentam-se na figura 5.21 os tomogramas representativos das amostras de calcário do meio poroso B, dispostos de forma semelhante, isto é, de acordo com o tratamento aplicado.



**Figura 5.21 – Amostras de calcário; Tipo B: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras consoante a proporção da dissolução de silicone**

À semelhança do meio poroso anterior, analisando os tomogramas relativos ao meio poroso B, é possível verificar através da presença de cor azul uma tendência de variação negativa das velocidades ultra-sónicas da base para o topo do provete em todas as amostras. Além disso, quando comparando as diferentes fatias em cada amostra, a fatia do meio continua a ser aquela que apresenta valores mais elevados com uma área considerável de cor vermelha. Estes tomogramas confirmam os resultados obtidos no ensaio de ultra-sons (vd. quadro 5.4), na medida em que as maiores velocidades ultra-sónicas correspondem às fatias do meio, seguidas das fatias da base e por fim das fatias do topo, com áreas preenchidas a azul de dimensões variadas, consoante a amostra.

Quanto à amostra que apresenta o menor ângulo de contacto,  $\theta = 108^\circ$  (correspondente à dissolução de silicone na proporção 1:6), a maior quantidade de cor azul presente nos tomogramas das diferentes fatias indica que esta amostra é aquela que apresenta um menor grau de compacidade (ou mesmo a existência de vazios). Os resultados dos dois ensaios realizados anteriormente, o de ultra-

sons e o de resistência à tracção por compressão diametral, comprovam efectivamente esta afirmação (vd. quadro 5.4). Em relação à amostra com  $\theta = 115^\circ$ , que corresponde à amostra com a dissolução de silicone na proporção 1:4, os tomogramas referentes às faces das fatias não parecem identificar vazios de grandes dimensões, traduzindo velocidades ultra-sónicas superiores. A amostra onde se introduziu a maior quantidade de silicone (proporção 1:2) e através da qual se alterou o ângulo de contacto para  $120^\circ$ , os tomogramas das respectivas fatias seguem a mesma ordem das amostras anteriores, isto é, zonas mais extensas de cor vermelha (mais uma vez em consonância com os valores de velocidades ultra-sónicas).

#### 5.4.3.3. Comparação entre as amostras cerâmicas e as amostras de calcário

Após a análise separada das amostras de cada material, cerâmico e calcário, procede-se agora à análise comparativa entre as mesmas consoante a dissolução de silicone introduzida. Tal como visto em 5.3.1, devido à natureza dos dois materiais surgem diferentes ângulos de contacto, mesmo tendo sido aplicada a dissolução de silicone na mesma proporção (em cada caso) nos dois conjuntos de amostras. Daí a comparação entre as amostras ser através da dissolução de silicone e não propriamente através do ângulo de contacto.

Assim, começa-se pelas amostras nas quais se introduziu a menor quantidade de silicone, ou seja, a dissolução de silicone na proporção 1:6, que se encontram na figura 5.22.

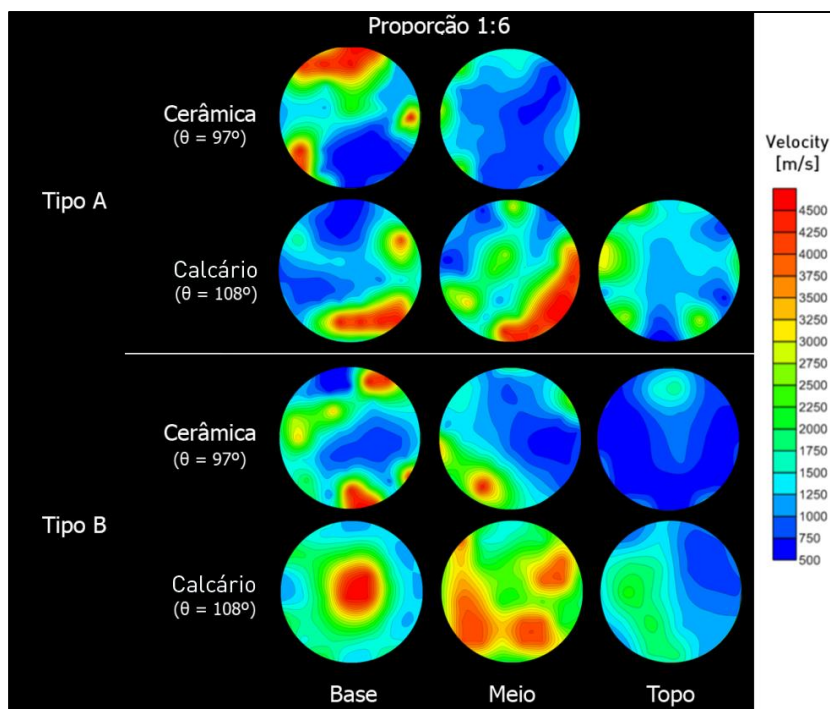
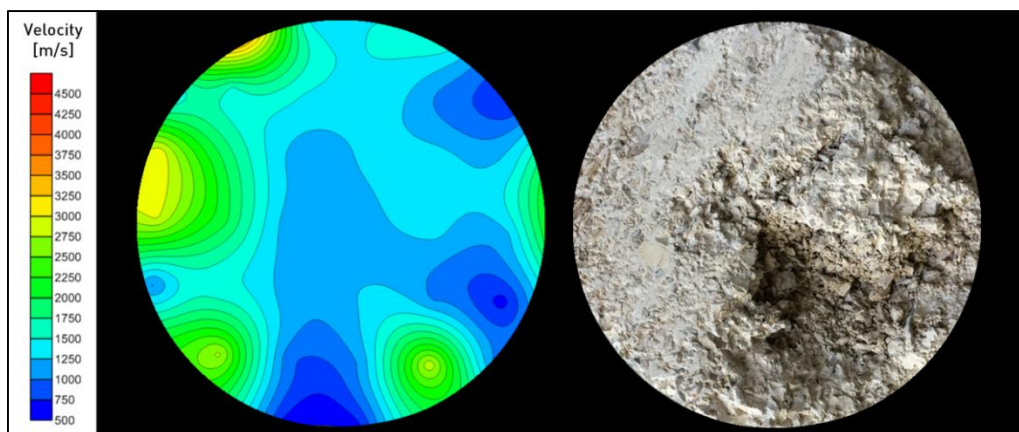


Figura 5.22 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:6: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas das amostras

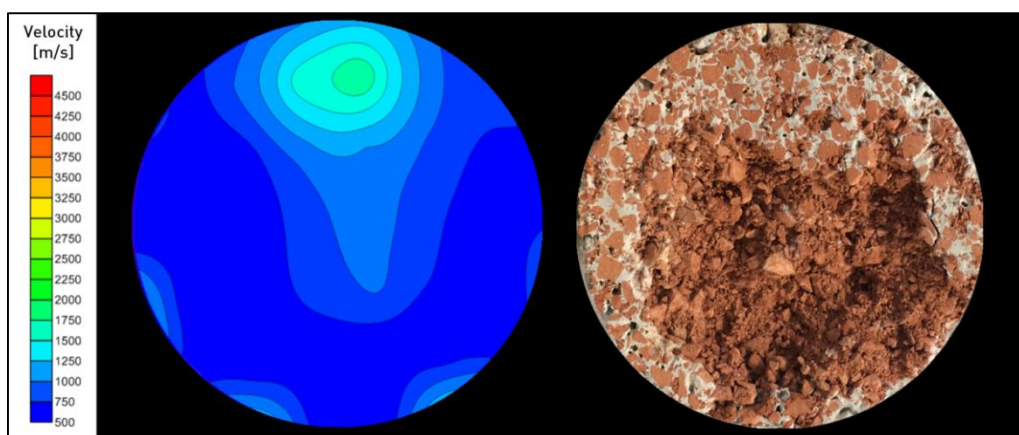
Observando os tomogramas das diferentes amostras, é possível afirmar que a introdução da dissolução de silicone na proporção 1:6 nos dois conjuntos de amostras originou melhores resultados nas amostras de calcário. Apesar de se terem registado valores baixos em ambos os conjuntos de amostras, traduzidos por uma grande quantidade de cor azul nos respectivos tomogramas, as duas amostras constituídas por pedra calcária ainda permitiram a injeção de *grout* até ao topo do cilindro. Nas amostras cerâmicas, foi apenas possível de ocorrer a injeção na sua totalidade na amostra do meio poroso B, como já visto anteriormente. É importante relembrar que o meio poroso A possui uma maior variabilidade dimensional que o meio poroso B (possui três tamanhos de partículas distintos, nomeadamente grosso, médio e fino), pelo que se pode considerar como um factor influente para a ocorrência de fenómenos como a obstrução do *grout*.

Em relação às restantes amostras, verifica-se igualmente uma fraca penetrabilidade do *grout* entre os vazios constituintes do meio, resultante de um forte efeito de sucção capilar (maior perda de água do *grout*), com maior evidência para amostra cerâmica. O menor (ou inexistente) preenchimento do *grout* no interior do meio poroso em algumas zonas proporcionou no posterior aparecimento de vazios de dimensões significativas, principalmente nas fatias do topo, que é traduzido pelas baixas velocidades ultra-sónicas. Após o processo de cura das amostras, as fracas resistências mecânicas também verificadas nessa zona são devidas não só à menor presença de *grout*, mas também à fraca ligação na interface *grout*/meio poroso. Outro factor que, eventualmente, contribuiu para o registo de maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário foi o menor volume de vazios resultante da retracção por dessecação do *grout* (Coelho, 2013). Trata-se de um tipo de retracção devido à evaporação e à absorção de água pelo meio poroso quando em contacto com o *grout*. A maior capacidade de absorção das partículas cerâmicas, relativamente às partículas de pedra calcária, origina maiores quantidades de água absorvida, o que origina uma superior retracção desse tipo nos meios porosos que as constituem, provocando o aparecimento de um maior volume de vazios.

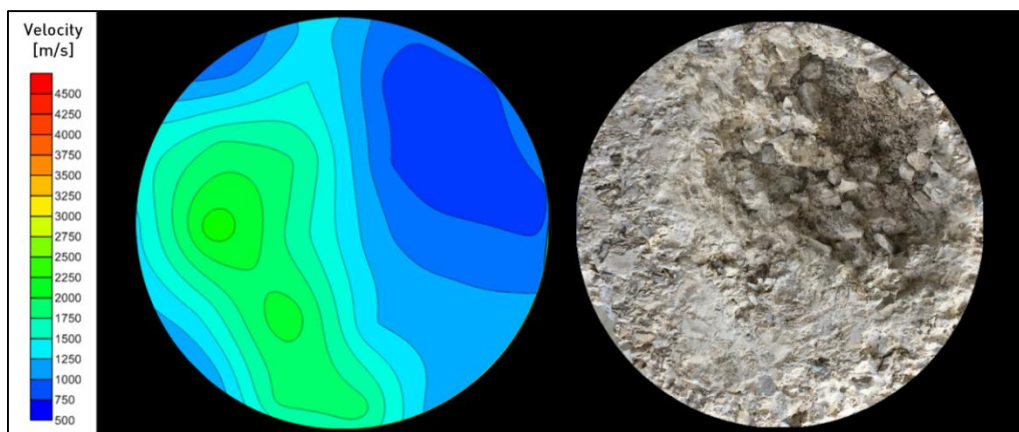
Através das figuras 5.23, 5.24 e 5.25, representativas da fatia do topo de cada amostra, os respectivos tomogramas e fotografias comprovam esta evidência, espelhando uma elevada semelhança entre as duas imagens.



**Figura 5.23 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

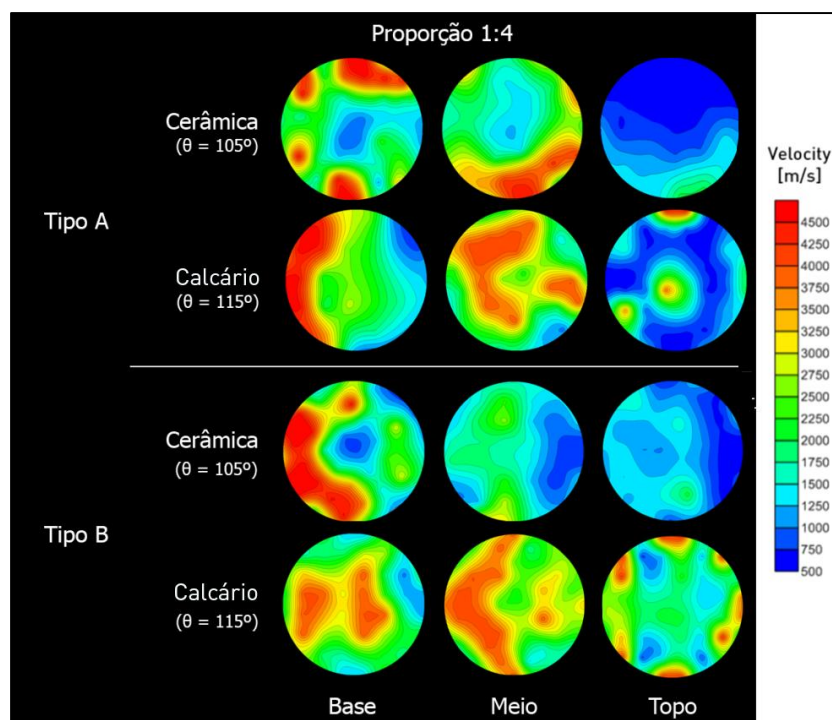


**Figura 5.24 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:6 ( $\theta = 97^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**



**Figura 5.25 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:6 ( $\theta = 108^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

Nos meios porosos nos quais se introduziu a dissolução de silicone na proporção 1:4, os tomogramas obtidos nas amostras dos dois diferentes materiais encontram-se na figura 5.26.

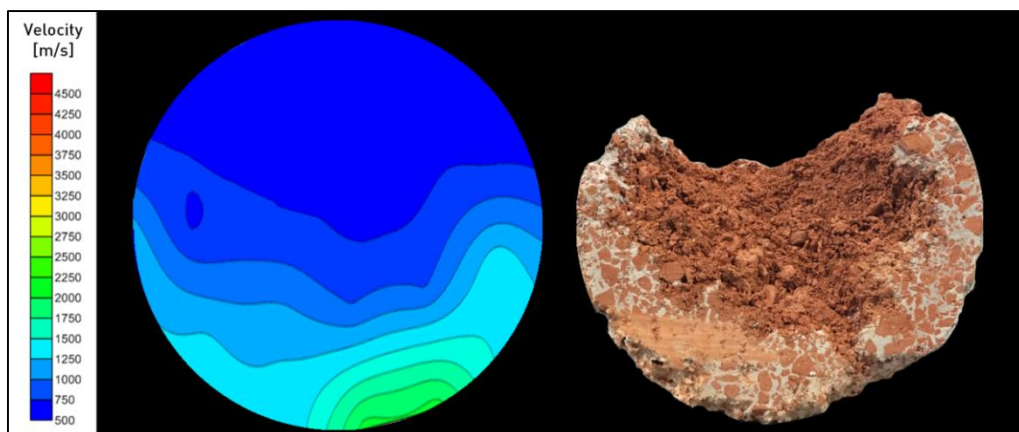


**Figura 5.26 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:4: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas das amostras**

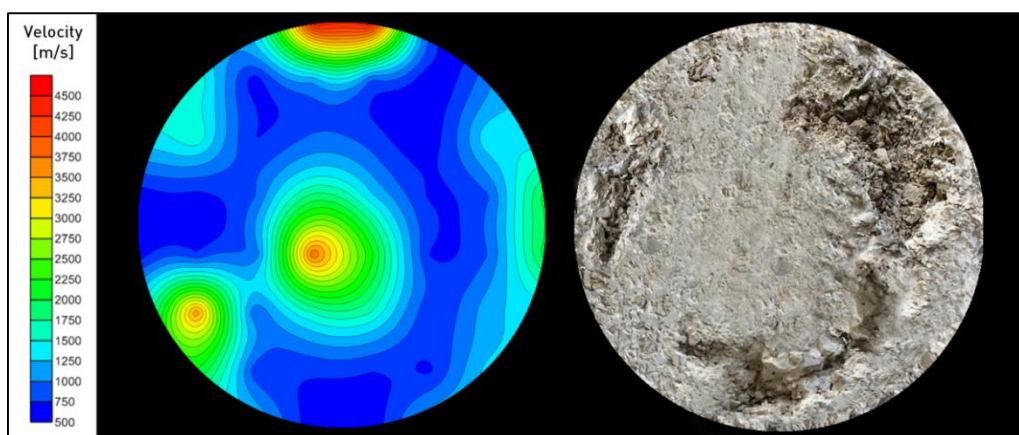
Tal como nas amostras onde se introduziu a dissolução de silicone na proporção 1:6, os tomogramas representativos das amostras com a proporção 1:4 revelam melhores resultados no caso do material calcário. As fatias do meio e do topo dão a entender que houve uma maior homogeneidade da injeção de *grout* em altura em todas as amostras constituídas por este material, principalmente pela maior área preenchida a vermelho. Como se pode verificar nos quadros 5.3 e 5.4, os valores das velocidades ultra-sónicas e das resistências mecânicas das amostras de calcário apresentam uma variação menos acentuada, apesar de negativa, em função da sua altura, o que comprova o melhor desempenho do *grout* aquando da injeção. Uma vez mais, através das fatias do topo pode constatar-se a melhor difusão de *grout* nas amostras de calcário comparativamente às amostras cerâmicas, quer para o meio poroso A, quer para o meio poroso B.

Nas figuras 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam-se então em pormenor os tomogramas das referidas fatias, assim como as respectivas fotografias, passíveis de uma melhor diferenciação entre as amostras.

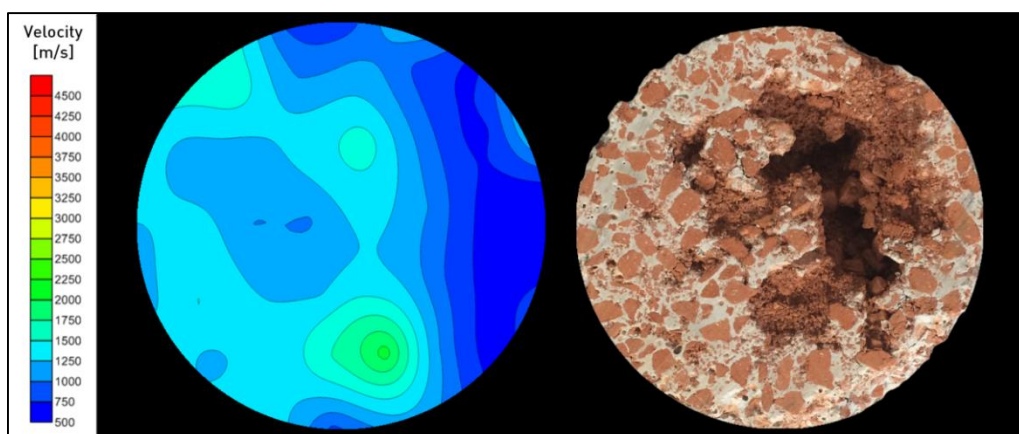




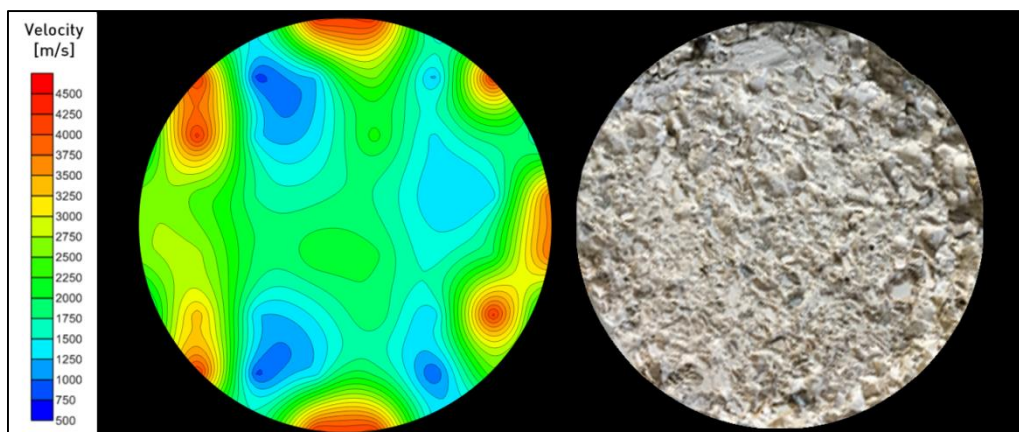
**Figura 5.27 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**



**Figura 5.28 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

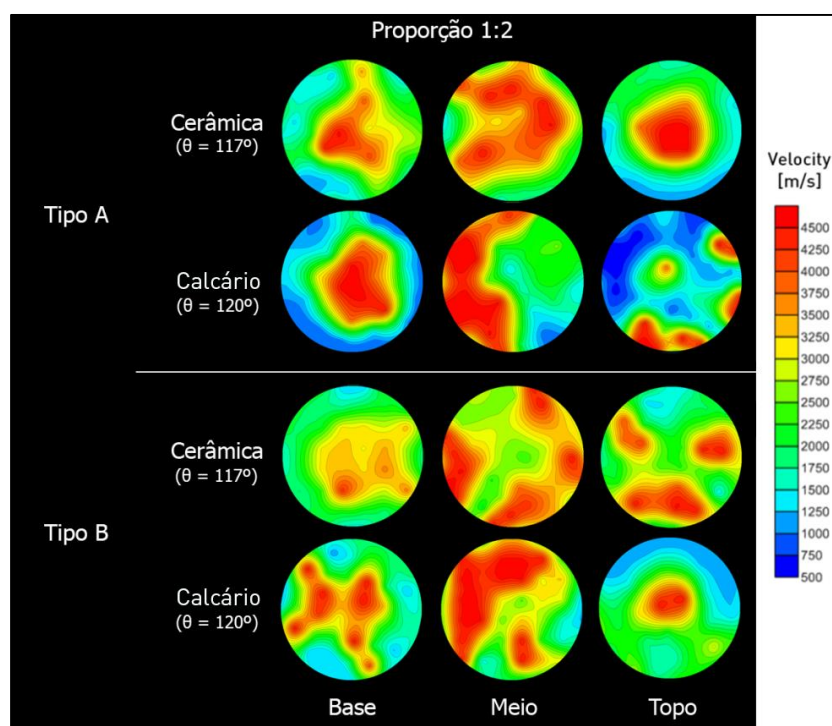


**Figura 5.29 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 105^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**



**Figura 5.30 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:4 ( $\theta = 115^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

Por último, apresentam-se na figura 5.31 os tomogramas relativos às amostras nas quais se introduziu a dissolução de silicone na proporção 1:2, que corresponde à alteração do ângulo de contacto para os valores mais elevados verificados no presente trabalho.

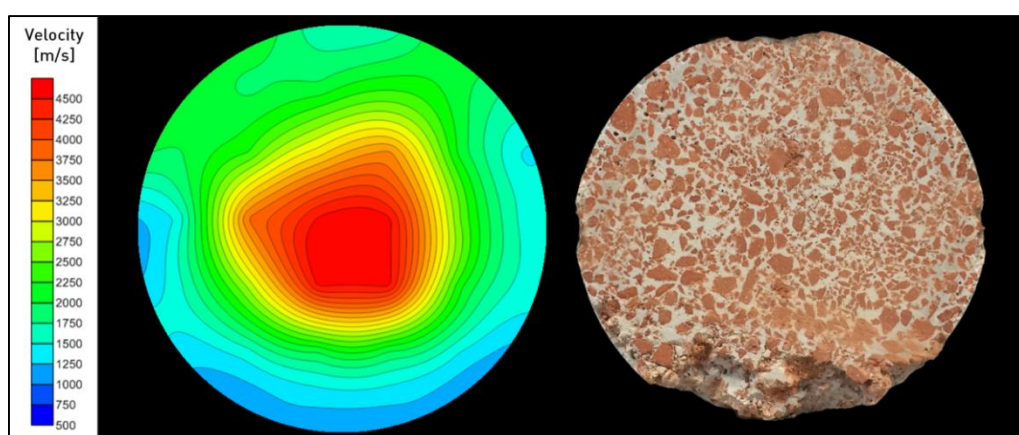


**Figura 5.31 – Amostras cerâmicas Vs. Amostras de calcário; Proporção 1:2: Tomogramas ultra-sónicos representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas das amostras**

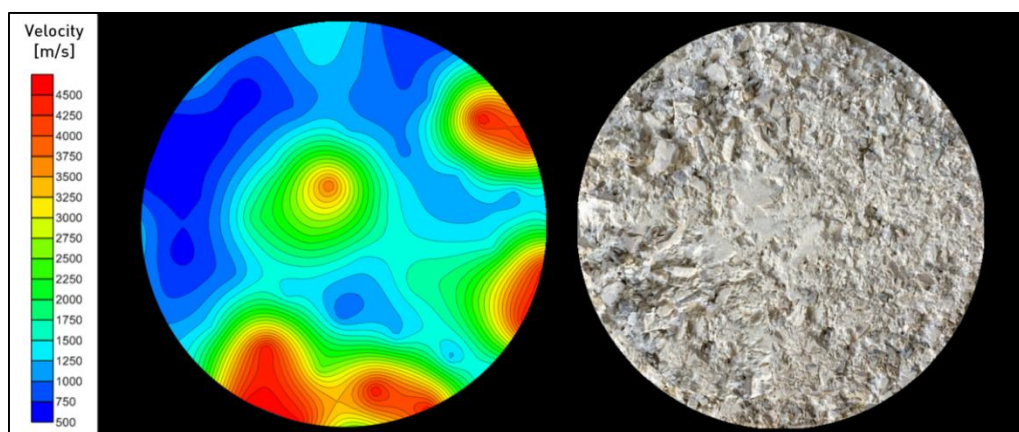
Contrariamente aos dois casos anteriores, a dissolução de silicone na proporção 1:2 parece proporcionar melhores resultados nas amostras cerâmicas e não nas amostras de calcário em todas as amostras, uma vez que a área preenchida a vermelho nos tomogramas de cada fatia evidencia em geral uma maior compacidade do meio. Estes tomogramas parecem ir de encontro aos resultados obtidos no

ensaio de ultra-sons, na medida em que o estado mais compacto, comprovado pelas velocidades ultra-sónicas corresponde a zonas de maior presença de cor vermelha. Além disso, mais que a ligação *grout*/meio poroso, o volume de *grout* injectado que envolveu as partículas proporciona uma maior resistência mecânica do conjunto após o processo de cura. Nesta situação de introdução da dissolução de silicone na proporção 1:2 houve uma maior facilidade de penetração do *grout* nas amostras cerâmicas, uma vez que estas apresentam maiores velocidades ultra-sónicas no local mais afastado da injeção, o que originou posteriormente uma maior resistência mecânica, quando comparando com as amostras de calcário.

Assim, tal como na análise efectuada anteriormente, apresentam-se os tomogramas e as respectivas fotografias das fatias do topo nas figuras 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35.

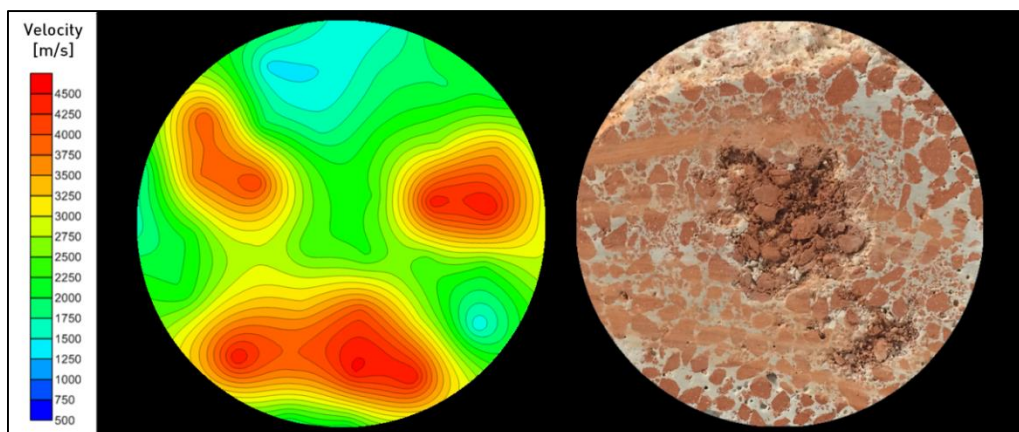


**Figura 5.32 – Amostra cerâmica; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

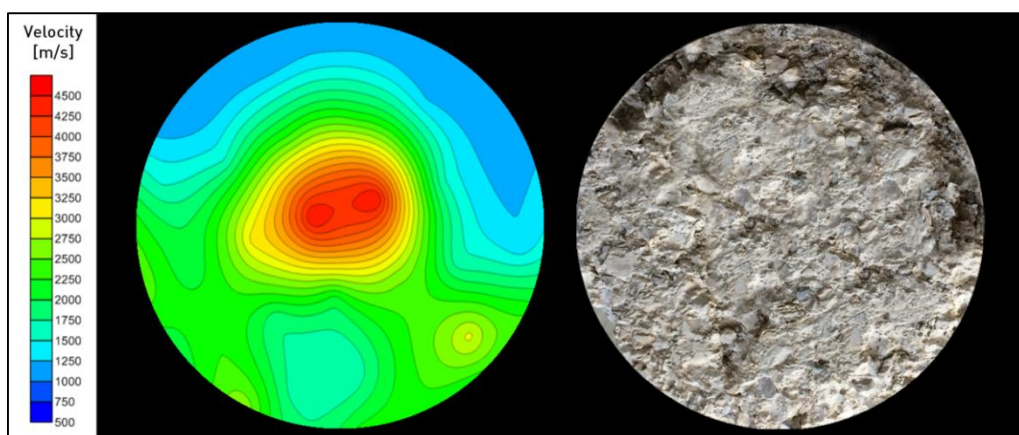


**Figura 5.33 – Amostra de calcário; Tipo A; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**





**Figura 5.34 – Amostra cerâmica; Tipo B; Proporção 1:2 ( $\theta = 117^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**



**Figura 5.35 – Amostra de calcário; Tipo B; Proporção 1:2 ( $\theta = 120^\circ$ ): Tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo**

#### **5.4.4. Pré-molhagem do meio poroso Vs. Tratamento de superfície**

Em outros trabalhos já realizados por outros autores [(Coelho, 2013), (Jorne et al., 2014), (Jorne et al., 2015b)] relativos ao estudo da injeção de *grout* em meios porosos, constatou-se que o recurso à pré-molhagem das amostras pode garantir uma melhor qualidade da injeção e a obtenção de melhores resultados de injectabilidade.

Este factor diferenciador da injeção, à semelhança da aplicação do tratamento hidrófugo de superfície, proporciona uma menor resistência à passagem do *grout*, que se traduz num melhor escoamento no interior do meio poroso. A menor resistência origina uma perda inferior de energia por parte do fluxo de *grout*, resultante das menores forças de Van-der-Waal's entre as paredes dos poros e as partículas de ligante (Coelho, 2013). O facto de o meio poroso se encontrar saturado, ao injectar-se o *grout* no seu interior, a pressão de sucção que se verifica na zona de contacto entre o *grout* e a superfície porosa passa a ser nula, o que contribui para uma menor resistência ao escoamento (Jorne et

al., 2014). Com efeito, verifica-se uma menor perda de água constituinte do *grout* quando comparando com o caso em que o meio poroso se encontra seco, permitindo assim ao *grout* conservar com maior facilidade as suas propriedades reológicas.

Assim, achou-se pertinente efectuar uma breve análise dos resultados de injectabilidade das amostras sujeitas aos dois factores distintos, a pré-molhagem do meio poroso e a introdução prévia do tratamento hidrófugo de superfície. Adicionalmente, apresentam-se as resistências à tracção por compressão diametral em ambos os casos referidos, pois assim avalia-se não apenas a capacidade de injeção do *grout* mas também a qualidade das ligações na interface *grout*/meio poroso.

Apresentam-se então nas figuras 5.36 e 5.37, os resultados provenientes dos dois ensaios acima referidos relativos às amostras cerâmicas e de calcário, respectivamente. De referir que os resultados respeitantes às amostras pré-molhadas foram obtidos por Jorne (Jorne et al., 2015b).

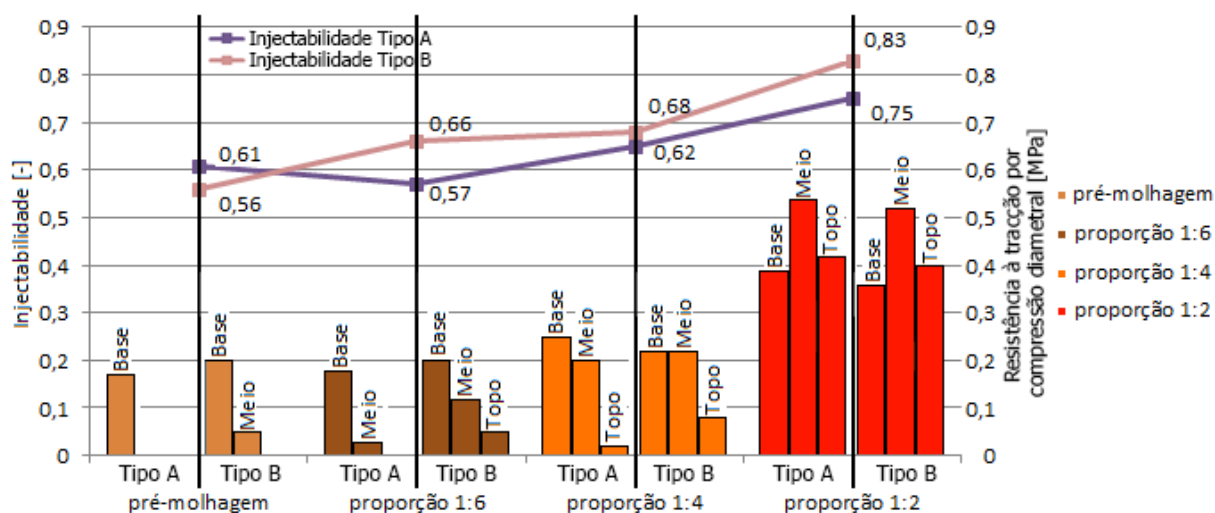


Figura 5.36 – Pré-molhagem Vs. Aplicação de tratamento de superfície: Resultados de injectabilidade e de resistência à tracção por compressão diametral das amostras cerâmicas

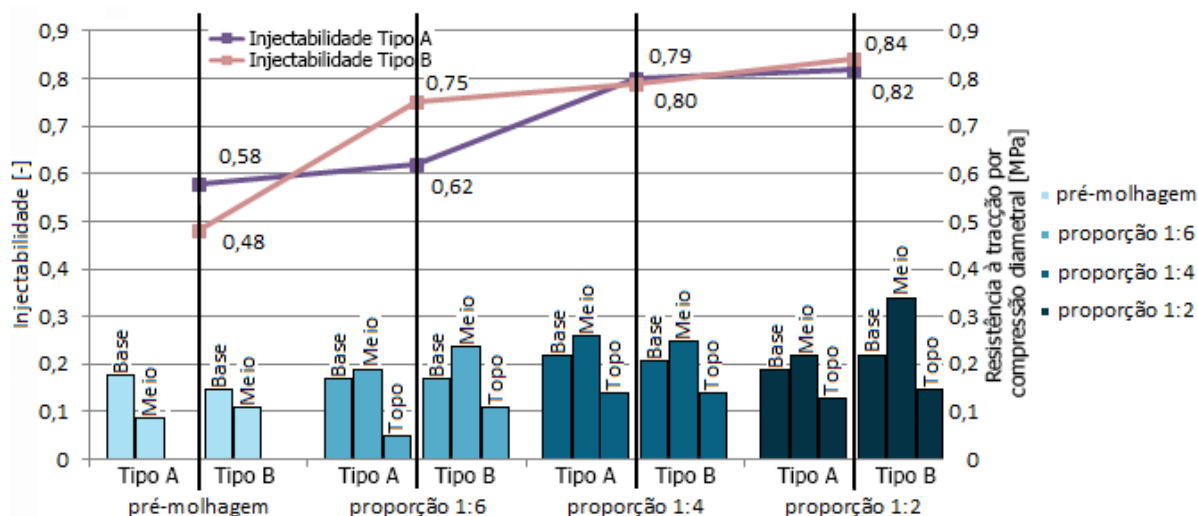


Figura 5.37 – Pré-molhagem Vs. Aplicação de tratamento de superfície: Resultados de injectabilidade e de resistência à tracção por compressão diametral das amostras de calcário

Observando em simultâneo os resultados das amostras cerâmicas e de calcário, é possível constatar que a introdução do tratamento hidrófugo revela uma maior eficácia na injectabilidade do *grout* dentro do meio poroso (tipo A e tipo B) seja qual for a proporção da dissolução de silicone utilizada. O facto da granulometria dos dois meios porosos proporcionar a existência de pequenos vazios no espaço interparticular, ao efectuar-se a pré-molhagem estes passam a estar preenchidos com água, o que poderá explicar a maior dificuldade de penetração do *grout* no interior do meio poroso. Além disso, o humedecimento do meio poroso resulta numa maior afinidade do *grout* às partículas do meio poroso, comparativamente à introdução do tratamento hidrófugo, ou seja, existe uma maior molhabilidade (que significa um menor ângulo de contacto) do meio poroso no caso da pré-molhagem. Nos casos em que se aplicou o tratamento, a barreira de hidro-repelência que lhe é conferida proporciona um maior incremento do ângulo de contacto, que é tanto maior quanto maior a proporção da dissolução de silicone aplicada sobre o meio poroso. Portanto, crê-se que nestes casos (de pré-molhagem) a obtenção de menores injectabilidades, comparativamente aos casos em que foi aplicado o tratamento hidrófugo, é devida ao menor ângulo de contacto entre o *grout* e a superfície porosa e não tanto ao efeito de sucção capilar por parte do meio poroso.

É também importante referir que a superfície das partículas ao estar saturada cria uma fina película à superfície, devido à tensão superficial das moléculas de água (zona de maior tensão superficial). Como referido no capítulo 2 (vd. 2.3.1), devido às ligações que se estabelecem entre os átomos de oxigénio e de hidrogénio, as moléculas de água tendem a atrair-se através de mecanismos coesivos, revestindo a superfície porosa em toda a sua extensão. Com efeito, as forças de atracção do *grout* às paredes da superfície porosa diminuem, diminuindo igualmente a capacidade do *grout* “molhar” a parede de poros. Nesta situação, a ligação por aderência das partículas do *grout* ao meio poroso é menor. Daí a razão para a obtenção de resultados de resistências à tracção por compressão diametral mais fracos em comparação com os resultados registados nas amostras com tratamento hidrófugo de superfície.

## 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Finalizadas as análises de resultados desenvolvidas nos capítulos 4 e 5, foi possível retirar um conjunto de conclusões relativas a cada fase da campanha experimental realizadas no presente trabalho. De referir, que os dois capítulos mencionados representam análises de resultados distintas: a primeira, referente ao estudo preliminar (primeira fase) da campanha experimental, no qual foi efectuada uma escolha do *grout* a utilizar na segunda fase, considerando-se diferentes dosagens de superplastificante na sua composição; a segunda, referente ao estudo principal da presente dissertação, incidiu na avaliação da influência de um factor diferenciador da injeção na injectabilidade do *grout*, nomeadamente através de uma pré-injeção de uma dissolução de silicone considerando diferentes proporções água:silicone (tratamento hidrófugo de superfície). O objectivo da introdução deste novo factor foi verificar a existência do aumento do ângulo de contacto entre o *grout* e superfície porosa, permitindo assim reduzir a capacidade de absorção do meio poroso ou, por outro lado, melhor conservar as propriedades reológicas do *grout* (menor perda da fluidez) durante o processo de injeção.

Partindo dos objectivos inicialmente propostos, apresenta-se agora o conjunto de conclusões gerais que permitem a compreensão global do comportamento dos elementos estudados, quer como produto individual, quer considerando-se o conjunto *grout*/meio poroso.

No que respeita ao estudo preliminar realizado na primeira fase da campanha experimental, concluiu-se em 4.4 que, entre as quantidades de superplastificante estudadas a utilizar na composição do *grout*, a dosagem de 1,2% de superplastificante corresponde à quantidade de adjuvante que evidenciou um melhor comportamento a todos os níveis. Face ao vasto conjunto de ensaios realizados nessa primeira fase, não restaram dúvidas acerca do melhor *grout* a utilizar posteriormente na segunda fase da campanha experimental, recaindo a escolha para o *grout* com a dosagem de 1,2% de superplastificante.

Relativamente à segunda fase da campanha experimental (capítulo 5), estudo principal da presente dissertação, pôde concluir-se que a aplicação da dissolução de silicone na superfície do meio poroso proporcionou a obtenção de melhores resultados, comparativamente aos casos em que não se efectuou qualquer modificação, em todos os ensaios realizados. Obviamente, consoante a proporção utilizada na dissolução alcançaram-se resultados distintos, contudo com tendências de evolução semelhantes, de aumento do ângulo de contacto entre o fluido e a superfície sólida em todas as amostras estudadas. Relembra-se que foram aplicadas três diferentes proporções de água:silicone em cada amostra, nomeadamente a proporção 1:6, a proporção 1:4 e a proporção 1:2.

Inicialmente, nesta fase do trabalho, foram efectuados ensaios complementares para uma

melhor caracterização dos dois materiais, cerâmico e calcário, os quais foram sujeitos ao tratamento de superfície acima mencionado. Começando pela medição do ângulo de contacto em cada material (vd. 5.3.1), registaram-se valores inferiores nas amostras constituídas por material cerâmico relativamente aos verificados nas amostras de calcário. E, à medida que foi aplicada uma maior proporção da dissolução de silicone sobre a superfície das amostras, mais hidrofugada esta se tornava, sendo possível constatar-se essa evidência através do aumento do ângulo de contacto entre o fluido e a superfície sólida referente a cada amostra estudada. Este parâmetro característico revelou-se especialmente importante neste estudo, visto que permitiu um melhor conhecimento da afinidade existente entre o fluido e o material em causa. Foi também efectuado o ensaio de absorção de água em cada meio poroso de cada material sujeito ao tratamento hidrófugo referido (vd. 5.3.2). Neste ensaio, verificaram-se valores superiores nas amostras cerâmicas, uma vez que, devido à sua natureza (de maior porosidade e tamanho dos poros), as partículas constituídas por tijolo cerâmico moído possuem uma maior capacidade de absorção do que as partículas de pedra calcária. Foi igualmente possível verificar que a maior capacidade de absorção do material cerâmico traduziu-se num maior decréscimo dos valores obtidos nas amostras respectivas, quer em termos relativos, quer em termos absolutos. Além disso, o facto de o meio poroso A apresentar uma superfície específica superior do que o meio poroso B, resultou num maior envolvimento das moléculas de água às paredes dos poros no primeiro meio poroso referido. Deste modo, parece ter-se encontrado a justificação para a diferença obtida entre os dois tipos de meio poroso em cada material, tendo sido alcançados valores superiores de absorção de água no meio poroso A. É importante referir que a maior proporção da dissolução de silicone utilizada, isto é, a proporção 1:2, proporcionou a obtenção de menores valores de absorção em todas as amostras, visto que lhes foram conferidas maiores propriedades de hidro-repelência (ou um número superior de propriedades apolares), tal como referido em 5.2.

Quanto aos ensaios de injeção, confirmou-se o que já era expectável, a obtenção de melhores resultados de injectabilidade com a introdução prévia do tratamento hidrófugo de superfície em ambos os meios porosos dos dois materiais utilizados (vd. 5.4.1). E, consoante o aumento da proporção da dissolução de silicone aplicada, foram registados valores superiores de injectabilidade. O aumento do ângulo do ângulo de contacto para um  $\theta$  superior a  $90^\circ$  (conferido pela introdução do tratamento) proporciona um menor grau de molhabilidade do meio poroso, e o fluido (neste caso, o *grout*) tende a comportar-se como um fluido não-molhante. Como tal, existe uma menor pressão de sucção capilar pelos poros constituintes do meio, que se traduz numa menor perda da água constituinte do *grout*. O maior grau de fluidez assim como a maior capacidade de retenção de água, resultante da redução do efeito de absorção do meio poroso, proporcionou ao *grout* uma penetrabilidade superior no interior do meio poroso. Já no estado endurecido, foi também possível verificar através do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, a melhoria da compacidade dessas amostras e da continuidade na zona de interface *grout*/meio poroso. Neste tipo de ensaio não-destrutivo a velocidade de propagação de ultra-sons é tanto maior quanto mais denso for o conjunto *grout*/meio poroso. Recorrendo ao ensaio de

resistência à tracção por compressão diametral, destrutivo, verificou-se em geral uma melhoria dos resultados nessas mesmas amostras. Ora, sabendo que este ensaio de resistência mecânica avalia a qualidade das ligações das partículas de ligante às partículas do meio poroso, uma vez que se verificou uma melhoria dos resultados das amostras com tratamento hidrófugo, a sua aplicação nessa zona de interface significaria a promoção da aderência entre estas, o que do ponto de vista químico não é correcto tal afirmação. Portanto, neste estudo, pôde concluir-se que o registo de maiores resistências mecânicas nas amostras estudadas principalmente nas quais se aplicou mais tratamento, não reside na qualidade das ligações na zona de interface *grout*/meio poroso (que é até minorada) mas sim no maior volume de *grout* injectado, resultante do menor efeito de sucção nas paredes dos poros aquando da injeção (devido ao aumento do ângulo de contacto entre o *grout* e a superfície hidrofugada).

Quanto à avaliação das injeções nos diferentes meios porosos verificou-se, no que diz respeito a velocidades ultra-sónicas, uma tendência geral da sua diminuição ao longo da altura das amostras cerâmicas e de calcário aquando da injeção (vd. 5.4.2.3). Apenas na amostra cerâmica do meio poroso A em que se aplicou a maior proporção da dissolução de silicone (proporção 1:2), se verificou claramente um melhor comportamento em altura, evidenciando um aumento das velocidades ultra-sónicas. Neste caso particular, constatou-se uma maior homogeneidade de injeção em altura, o que reflecte uma elevada eficácia do tratamento hidrófugo neste tipo de meio poroso. Na amostra cerâmica do meio poroso B com essa mesma proporção também se considerou um melhor comportamento de penetração do *grout* em altura apesar do gradiente das velocidades ultra-sónicas ser próximo de zero. Em ambos os casos referidos verificou-se um gradiente positivo das resistências mecânicas, o que transmite uma vez mais a consonância entre os valores das velocidades ultra-sónicas e das resistências mecânicas das fatias das amostras. Nos restantes casos, o efeito de sucção capilar nas amostras cerâmicas mostrou ser superior do que nas amostras de calcário, que pode ser explicado pela diferença de volume de vazios preenchido pelo *grout* entre os dois materiais. Por outras palavras, verificou-se a existência de uma maior difusão do *grout* nas amostras de calcário aquando da injeção. Tal diferença de comportamento teve maior evidência na zona mais afastada do local de entrada da injeção, através da obtenção dos valores mais baixos das velocidades ultra-sónicas na fatia do topo das amostras cerâmicas, comparativamente com as de calcário.

Na generalidade das amostras estudadas a análise simultânea dos dois conjuntos de resultados (cada conjunto referente a cada tipo de ensaio, de ultra-sons e de resistência mecânica) revelou uma utilidade considerável, uma vez que permitiu perceber com relativa facilidade a relação directa entre as velocidades ultra-sónicas e as resistências mecânicas de cada fatia da amostra em causa.

No entanto, há que salientar que a avaliação da técnica de injeção de *grout* em alvenarias antigas apenas recorrendo à utilização do ensaio de ultra-sons revela-se uma solução limitada, principalmente se na sua constituição existirem meios porosos com partículas finas, como é o caso. Nestas situações, de maior capacidade de absorção por parte do meio poroso (de aplicação do tratamento hidrófugo em menor quantidade), a injeção de *grout* tende a ser heterogénea, o que após o

processo de cura, resulta numa maior presença de vazios no interior do meio injectado, e tal evidência transmitir-se pelas menores velocidades ultra-sónicas. Ora, sabendo que a avaliação da velocidade de propagação de ultra-sons segundo este tipo de ensaio se procede em termos de valores médios, surge a necessidade da utilização da técnica de tomografia ultra-sónica. Tal como já afirmado por Guerreiro, (Guerreiro, 2014), esta técnica não-destrutiva permite avaliar de uma forma mais rigorosa as velocidades ultra-sónicas através da identificação exacta das zonas correspondentes aos vazios causados pela não presença do *grout* bem como a distribuição das velocidades com maior precisão, quer pelas imagens em 2D, quer em 3D. Além disso, a comparação dos tomogramas ultra-sónicos com as fotografias correspondentes do provete inteiro ou apenas da face da fatia provam que a utilização desta técnica de análise não-destrutiva constitui uma ferramenta bastante valiosa e fiável na detecção de vazios ou de zonas de menor compacidade das amostras.

Relativamente à comparação realizada entre os dois factores diferenciadores da injeção, a pré-molhagem e a aplicação do tratamento hidrófugo de superfície, foi possível retirar uma ilação com base nos dois respectivos conjuntos de resultados (resultados de injectabilidade e de resistência à tracção por compressão diametral). Nesta análise, concluiu-se que a maior afinidade do *grout* às partículas do meio poroso (que significa à existência menores ângulos de contacto entre os mesmos) nas amostras pré-molhadas, conduziu a maiores resistências à passagem do *grout* dentro do meio poroso que, por sua vez, provocou menores injectabilidades, comparativamente às amostras nas quais se aplicou o tratamento. A razão encontrada para a obtenção de piores resultados de resistências mecânicas também nas amostras pré-molhadas reside essencialmente na película de água formada na zona de interface *grout*/meio poroso, que após o processo de cura, torna essa zona de ligação numa zona descontínua (apenas com a presença de ar). Consequentemente, a ligação mecânica que existe nessa zona referida constitui a principal causa para o registo de menores valores de resistência à tracção por compressão diametral nessas amostras pré-molhadas.

Quanto ao prosseguimento do presente trabalho, no qual é avaliada a influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de *grouts*, sugerem-se várias alternativas possíveis, igualmente consideradas úteis nesta temática.

No que respeita ao tratamento hidrófugo de superfície, seria interessante estudar outras proporções, com maiores quantidades de silicone, na dissolução a introduzir previamente no meio poroso. O objectivo da inclusão destas novas proporções seria o de averiguar a possibilidade da existência de um decréscimo da resistência à tracção por compressão diametral, em simultâneo de uma pequena variação de aumento ou mesmo de inalteração dos níveis de injectabilidade do *grout* nas amostras sujeitas a esse tratamento.

Igualmente passível de desenvolvimentos futuros poderá ser a introdução da dissolução de silicone na composição do *grout* e não a sua aplicação sobre a superfície do meio poroso. Deste modo, seria possível efectuar uma comparação dos resultados obtidos entre os dois métodos de avaliação da influência da alteração do ângulo de contacto na injectabilidade de *grouts*.

## BIBLIOGRAFIA

- Aiad, I. - *Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes*. Cement and Concrete Research, 2003.
- Aïtcin, P. - *High performance concrete*. E & FN Spon, 1998.
- Almeida, N.; Paula, A.; Pinto, F.; Gomes, A. - *Caldas de injeção para alvenarias antigas fluidez versus capacidade de injeção*. Congresso Construção Coimbra 2012, págs. 1–12, 2012.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete*. C 939-02, United States, ASTM, 2002a.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Water Retentivity of Grout Mixture for Preplaced-Aggregate Concrete*. C 941-02, United States, ASTM, 2002b.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. C 597-02, United States, ASTM, 2002c.
- American Society for Testing and Materials, (ASTM) - *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete*. C496/496M-04, United States, ASTM, 2004.
- Anzani, A.; Binda, L.; Lualdi, M.; Tedeschi, C.; Zanzi, L. - *Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry*. ECNDT 2006, Volume 3, págs. 1–7, 2006.
- Assaad, J.; Daou, Y. - *Cementitious grouts with adapted rheological properties for injection by vacuum techniques*. Cement and Concrete Research, Volume 59, págs. 43–54, 2014.
- Baltazar, L.; Henriques, F. - *Rheology of Grouts for Masonry Injection*. Key Engineering Materials, Volume 624, págs. 283–290, 2015.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Cidade, M. - *Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation*. Journal of Civil Engineering and Management, 2012a.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. - *Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments*. Construction and Building Materials, Volume 35, págs. 838–845, 2012b.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F. - *Hydraulic lime grouts for masonry injection - Effects of admixtures on the fresh grout properties*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2012c.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. - *The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls*. Rheologica Acta, Volume 52, págs. 127–138, 2013a.
- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. - *Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: an experimental study*. 13th International Conference on Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture, New Forest, UK, 25th-27th June, págs. 417–430, 2013b.



- Baltazar, L.; Henriques, F.; Jorne, F.; Cidade, M. - *Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts*. Construction and Building Materials, Volume 50, págs. 584–597, 2014.
- Banfill, P. - *Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures*. Construction and Building Materials, Volume 25, págs. 2955–2960, 2011.
- Biçer-Şimşir, B.; Griffin, I.; Palazzo-Bertholon, B.; Rainer, L. - *Lime-based injection grouts for the conservation of architectural surfaces* págs. 3–17, 2009.
- Binda, L.; Baronio, G.; Tiraboschi, C.; Tedeschi, C. - *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto*. Construction and Building Materials, Volume 17, págs. 629–639, 2003a.
- Binda, L.; Lualdi, M.; Saisi, A. - *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage, Volume 1, págs. 380–402, 2007.
- Binda, L.; Modena, C.; Baronio, G.; Abbaneo, S. - *Repair and investigation techniques for stone masonry walls*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 133–142, 1997.
- Binda, L.; Saisi, A. -. *Knowledge of the building, on site investigation and connected problems*. Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshoppágs. 213–224, 2009.
- Binda, L.; Saisi, A.; Tedeschi, C. - *Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications, Fracture and Failure of Natural Building Stones-Applications in the Restoration of Ancient Monuments*. Elsevier, 2006.
- Binda, L.; Saisi, A.; Zanzi, L. - *Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolò l'Arena (Italy)*. NDT & E International, Volume 36, págs. 215–227, 2003b.
- Bjornstrom, J.; Chandra, S. - *Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements*. Materials and Structures, 2003.
- Bracco, G.; Holst, B. - *Contact Angle and Wetting Properties*. Springer Series in Surface Sciences, Volume 51, 2013.
- Brás, A. - *Grout optimization for masonry consolidation*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- Brás, A.; Henriques, F. *The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties*. Materials and Structures, Volume 42, págs. 1423–1432, 2009.
- Brás, A.; Henriques, F. - *Natural hydraulic lime based grouts – The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, Volume 26, págs. 135–144, 2012.
- Buyukozturk, O. - *Imaging of concrete structures*. NDT & E International, Volume 31, págs. 233–243, 1998.

- Callebaut, K.; Elsen, J.; Van Balen, K.; Viaene, W. - *Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement? Cement and Concrete Research*, 2001.
- Cantini, L.; Felicetti, R.; Zanzi, L.; Munda, S.; Meana, M.; Binda, L. - *Sonic tomography applied to historic masonry structures: validation of the testing methodology and of the data elaboration by different computer codes*. Proc14th international conference – structural faults & repair, Scotland, 3rd–5th July, 2012.
- Coelho, J. - *Avaliação da injeção de grouts em alvenarias antigas com ensaios não destrutivos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Collepari, M. - *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. Materials and Structures, Volume 23, págs. 81–102, 1990.
- Concu, G.; De Nicolo, B.; Piga, C.; Popescu, V. - *Non-Destructive Testing of Stone Masonry using Acoustic Attenuation Tomography Imaging*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May, 2010a.
- Concu, G.; De Nicolo, B.; Piga, C.; Popescu, V. - *Measurement system for non-destructive testing using ultrasonic tomography spectral attenuation*. 12th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 20th–22th May. págs. 1016–1020, 2010b.
- Correia, J. - *Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Domone, P. - *The slump flow test for high-workability concrete*. Cement and Concrete Research, 1998.
- Eklund, D.; Stille, H. - *Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, págs. 389–398, 2008.
- EN 1015-11 - *Methods of test for mortar for masonry - Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, 1999.
- Eriksson, M.; Friedrich, M.; Vorschulze, C. - *Variations in the rheology and penetrability of cement-based grouts—an experimental study*. Cement and Concrete Research, 2004.
- FCT - UNL - *Ficha de ensaio FE 13 - Pedras naturais e artificiais, Velocidade de propagação do som*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1996.
- Fernandèz-Altable, V.; Casanova, I. - *Influence of mixing sequence and superplasticizer dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures*. Cement and Concrete Research, Volume 36, págs. 1222–1230, 2006.
- Flatt, R.; Houst, Y. - *A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers*. Cement and Concrete Research, Volume 31, págs. 1169 – 1176, 2001.
- Groen, J.; Peffer, L.; Perez-Ramirez, J. - *Microporous Mesoporous Materials*, 60, 2003.
- Guerreiro, J. - *Avaliação do efeito combinado de temperatura , tempo de repouso e pressão de injeção na eficiência de injeção de grouts*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

- Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Hanehara, S.; Yamada, K. - *Rheology and early age properties of cement systems*. Cement and Concrete Research, Volume 38, págs. 175 – 195, 2008.
- Heikal, M.; Aiad, I. - *Influence of delaying addition time of superplasticizers on chemical process and properties of cement pastes*, 2008.
- Henriques, F. - *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Lisboa, UNL - FCT, 2011.
- Ignoul, S.; Van Rickstal, F.; Van Gemert, D. - *Application of mineral grouts. Case study and impact on structural behaviour: Church of St. Catharina at Duisburg (B)*, 2005.
- Jorne, F. - *Comunicação particular*. Departamento Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- Jorne, F.; Henriques, F. - *Study of hydraulic lime grout injections in different porous media: an experimental study*. WIT Transactions on The Built Environment, Volume 131, págs. 1743–3509, 2013.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Grout injection in porous media with different internal structures*. Proceedings of the 14th International Conference - Structural Faults & Repair, Scotland, 3rd – 5th July, 2012a.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. Congresso Construção 2012, Coimbra, 18-20 de Dezembro, 2012b.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography*. Construction and Building Materials, Volume 66, págs. 494–506, 2014.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Evaluation of consolidation of different porous media with hydraulic lime grout injection*. Journal of Cultural Heritage, Volume 16, págs. 438–451, 2015a.
- Jorne, F.; Henriques, F.; Baltazar, L. - *Injection capacity of hydraulic lime grouts in different porous media*. Materials and Structures, Volume 48, págs. 2211–2233, 2015b.
- Kalagri, A.; Miltiadou-Fezans, A.; Vintzileou, E. - *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*. Materials and Structures, Volume 43, págs. 1135–1146, 2010.
- Klein, N.; Bachmann, J.; Aguado, A.; Toralles-Carbonari, B. - *Evaluation of the wettability of mortar component granular materials through contact angle measurements*. Cement and Concrete Research, Volume 42, págs. 1611–1620, 2012.
- Laeffer, D.; Baronio, G.; Anzani, A.; Binda, L. - *Measurement of Grout Injection Efficacy for Stone Masonry Walls*, 1996.
- Le Roy, R.; Roussel, N. - *The Marsh Cone as a viscometer : theoretical analysis and practical limits*, 2004.

- Luso, E. - *Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Minho, 2012.
- Martins, R.; Bombard, A. - *Rheology of fresh cement paste with superplasticizer and nanosilica admixtures studied by response surface methodology*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 905–921, 2011.
- Matos, J. - *Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- Miltiadou-Fezans, A. - *Contribution à l'étude des coulis hydraulique pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*, 1990.
- Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. - *Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 1817–1828, 2012.
- Miltiadou-Fezans, A.; Tassios, T. - *Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening*. Materials and Structures, Volume 46, págs. 1631–1652, 2013.
- Nehdi, M.; Mindess, S.; Aïtcin, P. - *Statistical modelling of the microfiller effect on the rheology of composite cement pastes*. Cement and Concrete Research, 1997.
- NP EN 1097-6 - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*, 2003.
- NP EN 445 - *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço – Métodos de ensaio*, 2008.
- Rato, V. - *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.
- Reda Taha, M.; Shrive, N. - *The use of pozzolans to improve bond and bond strength*, 2001.
- Rosquoët, F.; Alexis, A.; Khedlidj, A.; Phelipot, A. - *Experimental study of cement grout*. Cement and Concrete Research, 2003.
- Roussel, N. - *Rheology of fresh concrete : from measurements to predictions of casting processes*. Materials and Structures, Volume 40, págs. 1001–1012, 2007.
- Roussel, N.; Le Roy, R. - *The Marsh Cone: a test or a rheological apparatus?*. Cement and Concrete Research, 2004.
- Roussel, N.; Lemaître, A.; Flatt, R.; Coussot, P. - *Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art.*. Cement and Concrete Research, Volume 40, págs. 77 – 84, 2010.
- Schullerl, M.; Atkinson, R.; Berra, M.; Binda, L. - *Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 199–204, 1997.

- Sonebi, M.; Lachemi, M.; Hossain, K. - *Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticized cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture*, 2013.
- Svermova, L.; Sonebi, M.; Bartos, P. - *Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder*. Cement and Concrete Composition, 2003.
- Torraca, G. - *Matériaux de construction poreux, science des matériaux pour la conservation architecturale*. ICCROM, 1986.
- Toumbakari, E. - *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*, 2002.
- Toumbakari, E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.; Vintzileou, E. - *Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2005.
- Uranjek, M.; Bosiljkov, V. - *Uranjek, M. In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building*, 2012.
- Valluzzi, M. - *Comportamento Meccanico de Murature Consolidate Com Materiali e Technique a Base di Calce*, 2000.
- Valluzzi, M. - *Requirements for the choice of mortar and grouts for consolidation of three-leaf stone masonry walls*, 2005.
- Valluzzi, M.; Porto, F.; Modena, C. - *Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls*. Materials and Structures, 2004.
- Van Rickstal, F. - *Grout Injection of Masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- Van Rickstal, F.; Toumbakari, E.; Ignoul, S.; Van Gemert, D. - *Development of mineral grouts for consolidation injection*. In Consolidation of Masonry, Ed. D. Van Gemert, Advances in Materials Science and Restoration. págs. 61–70, 2003.
- Vikan, H. - *Rheology and reactivity of cementitious binders with plasticizers*, 2005.
- Vintzileou, E. - *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical properties of Masonry before and after Grouting*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2006.
- Vintzileou, E. - *The Bond Mechanism in Stone- or Brick-to-Grout*, 2009.
- Vintzileou, E. - *Three-Leaf Masonry in Compression, Before and After Grouting: A Review of Literature*, 2011.
- Wallevik, J. - *Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown*. Cement and Concrete Research, 2009.
- Webb, P.; Orr, C. - *Analytical methods in fine particle technology*. Micromeritics Instrument Corporation, 1997.

Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanahara, S.; Matsuhisa, M. - *Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer*. Cement and Concrete Research, Volume 30, págs. 197–207, 2000.